

**Méthode de dimensionnement
de l'éclairage d'entrée des
tunnels routiers**

Résumé

Le présent document décrit la méthode préconisée par le CETU afin de déterminer les niveaux de luminance de chaussée nécessaires dans la zone d'entrée des tunnels. Il actualise la précédente méthode de dimensionnement du Guide de l'Eclairage des Tunnels Routiers de 1985 [1] et intègre les résultats les plus récents des recherches effectuées dans le domaine de la visibilité. Il explique la méthodologie utilisée pour calculer les niveaux de luminance de chaussée nécessaires en tunnel qui sont indiqués dans le Dossier Pilote des Tunnels, document 4:Equipements, section 4.2 : Eclairage [2].

La méthode retenue est basée sur le principe de la visibilité continue d'un obstacle type par un conducteur malgré les variations de l'environnement. Elle diffère quelque peu des méthodes préconisées par des organismes tels que le Comité Européen de Normalisation (CEN) [4] ou la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) [3], qui ont un caractère empirique et qui intègrent des notions de confort variables selon les types de trafics.

1. PROBLÉMATIQUE.....	1
2. LES BASES DU DIMENSIONNEMENT DE L'ÉCLAIRAGE.....	2
2.1 Rappels et Définitions.....	2
2.1.1 Grandeurs photométriques.....	2
2.1.2 Les autres définitions.....	3
2.2 Caractérisation des obstacles et de l'installation.....	4
2.3 Quels sont les phénomènes subis par un conducteur?.....	5
2.3.1 L'adaptation spatiale.....	5
2.3.2 L'adaptation temporelle.....	6
2.4 Les lois existantes pour résoudre l'adaptation spatiale [5].....	7
2.4.1 La loi RCS.....	7
2.4.2 La loi d'ADRIAN.....	9
2.4.3 Choix d'une loi pour le dimensionnement de l'éclairage.....	11
2.5 Les modèles mathématiques de résolution de l'adaptation temporelle.....	14
2.5.1 Les expériences de DE BOER [8].....	14
2.5.2 Les expériences de SCHREUDER [9].....	15
2.5.3 Comparaison des résultats des expériences des professeurs DE BOER et SCHREUDER.....	17
2.5.4 Conclusions de ces études.....	18
2.5.5 Détermination d'une fonction de décroissance admissible.....	18
2.6 Les conditions réelles : introduction des voiles parasites.....	19
2.7 La résolution du problème de l'adaptation spatiale.....	21
2.7.1 Calcul de la luminance d'adaptation et des voiles parasites.....	21
2.7.2 Caractérisation de l'installation.....	23
2.7.3 Objets en limite de visibilité.....	25
2.7.4 Apport de la lumière extérieure.....	26
2.8 Comparaisons avec les autres méthodes (CIE et CEN) ([3], [4]).....	29
2.8.1 Les expériences de SCHREUDER [9] et DE BOER.....	29
2.8.2 Les expériences d'ADRIAN [11].....	31
2.8.3 La méthode CIE.....	32
2.8.4 Rapport entre le contraste de la cible et son coefficient de réflexion.....	33
3. LES CALCULS.....	35
3.1 Les hypothèses simplificatrices.	35
3.2 L'algorithme.....	35
3.2.1 Vérification de l'adaptation spatiale.....	36
3.2.2 Vérification de l'adaptation temporelle.....	36
3.3 La solution provisoire.....	36
3.4 Calcul de la luminance d'adaptation et de L20°.....	37
3.4.1 Longueur visible.....	39
3.4.2 Point d'attention du conducteur.....	39
3.5 Correction due à l'adaptation spatiale.....	40
3.6 L'adaptation temporelle.....	40
3.6.1 Modèle de correction.....	41

3.6.2 Voiles parasites.....	42
3.6.3 Limitations des corrections.....	43
3.7 Calcul de l'apport extérieur.....	43
3.8 Prise en compte du profil en long.....	44
4. EXEMPLE DE CALCULS.....	45
4.1 Voiles extérieurs utilisés.....	45
4.1.1 Voiles résultants.....	45
4.2 Exemple de tunnel.....	47
4.2.1 Résultats avec apport de lumière extérieure.....	48
4.2.2 Résultats sans apport de lumière extérieure.....	49
4.3 Résultats généraux.....	51
4.4 Etude de la distance de visibilité.....	53
5. ANNEXE 1.....	56
5.1 Luminance moyenne de l'environnement et éclairage horizontal au seuil du tunnel.....	56
5.2 Estimation de l'éclairage vertical au droit de l'entrée:.....	56
5.2.1 Luminance moyenne de l'environnement et éclairage vertical.....	57
5.2.2 Luminance moyenne de la chaussée extérieure et éclairage vertical.....	57
6. ANNEXE 2: LES RÉFLEXIONS PARASITES.	57
6.1 Modification de l'éclairage vertical due aux réflexions parasites.....	58
6.2 Influence des piédroits sur l'éclairage horizontal.....	59
6.3 Influence de la chaussée intérieure sur l'éclairage vertical.....	60
6.4 Changement de revêtements.....	61
6.5 Conclusions.....	62
6.5.1 Eclaircissement de la chaussée.....	62
6.5.2 Diminution de l'éclairage horizontal.....	63
7. BIBLIOGRAPHIE :.....	65

1. Problématique.

De jour, un automobiliste qui s'apprête à traverser un tunnel va quitter un itinéraire lumineux pour pénétrer dans une zone sombre peu éclairée. Son environnement lumineux évolue rapidement risquant d'une part de provoquer une gêne en cas de variations trop brutales, et d'autre part de créer des zones de mauvaise visibilité.

Tout au long de son déplacement, l'automobiliste doit être en mesure de discerner un obstacle gisant sur la chaussée, suffisamment loin devant lui pour pouvoir s'arrêter en toute sécurité. Or la capacité visuelle de l'homme dépend de son état d'adaptation déterminé par l'environnement lumineux. Ce dernier varie continuellement et modifie la capacité de l'automobiliste à percevoir les obstacles potentiels qui risquent ainsi de ne plus être détectables.

La seule solution permettant de rendre acceptables ces variations consiste à adapter en chaque point, grâce à l'installation d'éclairage, la luminance de la chaussée à un niveau suffisant pour discerner les obstacles et pour éviter les transitions trop rapides.

L'installation d'éclairage de l'ouvrage doit rendre les changements supportables et permettre à l'usager de traverser le tunnel avec un maximum de sécurité.



photo n°1: Tunnel de la Grand Mare (Rouen).

2. Les bases du dimensionnement de l'éclairage.

2.1 Rappels et Définitions.

2.1.1 Grandeurs photométriques.

Le **flux énergétique** Φ_e représente la puissance émise par une source ou reçue par un récepteur sous forme de rayonnement (exprimé en watt W).

Le **flux lumineux** Φ_l incorpore l'efficacité lumineuse du rayonnement. En effet la sensibilité de l'oeil humain varie en fonction de la longueur d'onde du rayonnement. Cette sensibilité est une fonction de la longueur d'onde λ du rayonnement notée $V(\lambda)$. La relation entre le flux lumineux et le

flux énergétique est $\Phi_l = K_m \times \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ avec $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Le flux lumineux est exprimé en lumen.

L'**intensité lumineuse** I d'une source dans une direction donnée est le rapport entre le flux lumineux émis dans le cône d'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée par la valeur de cet angle solide:

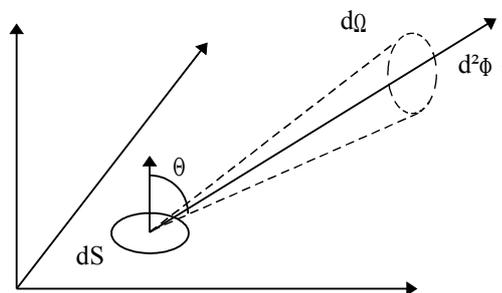
$$I = \frac{d\Phi_l}{d\Omega} \text{ (exprimé en candela).}$$

L'**éclairement** E en un point M au centre d'une surface élémentaire dS est le rapport du flux lumineux reçu par cette surface à l'aire de cette surface: $E = \frac{d\Phi_l}{dS}$ (en lux).

La **luminance** L d'une surface d'aire dS , dans un cône de direction donnée est égale à

$$L = \frac{d^2\Phi_l}{dS \times \cos(\theta) \times d\Omega} \text{ où:}$$

d^2 représente la dérivée seconde du flux Φ_l , c'est-à-dire que $d^2\Phi_l$ est le flux élémentaire émis par la surface dS dans la direction matérialisée par l'angle solide $d\Omega$, et θ est l'angle entre la normale à la surface dS et la direction d'observation. La luminance traduit l'impression lumineuse de la surface dS observée depuis un point situé dans la direction donnée.



Une surface sera parfaitement **diffusante** ou **orthotrope** lorsque sa luminance sera indépendante de la direction d'observation.

Le **coefficient de réflexion** ρ caractérise alors cette surface et permet de calculer sa luminance L par la formule: $L = \rho \times \frac{E}{\pi}$ (formule de Lambert) où E est l'éclairement reçu par cette surface.

Le **coefficient de clarté** représente l'extension de cette notion aux surfaces dont la luminance

dépend de la direction d'observation selon la même définition $L = \rho \times \frac{E}{\pi}$. Le coefficient de clarté ρ dépend alors de la direction d'observation et de la façon dont est réalisé l'éclairement E . Dans le cas d'une chaussée, les angles d'observation restent compris entre 0,5 et 1,5 degrés. Dans cette plage, le coefficient de clarté ne varie pratiquement pas, ce qui rend possible l'utilisation d'un tel coefficient pour effectuer les transformations luminance - éclairement au moyen de la formule précédente, à condition que les caractéristiques de l'installation restent les mêmes.

2.1.2 Les autres définitions.

Le **contraste** C d'un objet placé devant un fond donné est égal à : $C = \frac{L_o - L_f}{L_f} = \frac{\Delta L}{L_f}$ ou L_o et L_f sont les luminances de l'objet et du fond, perçues par l'observateur et $\Delta L = L_o - L_f$ leur différence. Un objet sera d'autant plus visible que son contraste avec le fond sera important, et inversement il sera peu visible lorsque ce dernier sera faible. Il faut noter que le contraste peut être **positif**, lorsque la luminance de l'objet est supérieure à la luminance du fond, ou **négatif** dans le cas contraire. Un objet vu en contraste positif apparaît plus clair que le fond. En cas d'égalité des luminances L_o et L_f , le contraste est nul et l'objet ne peut être distingué sur le fond.

Le **contraste minimum décelable** (ou **contraste de seuil**) C_s est la valeur du contraste d'un objet en limite de visibilité. Si le contraste entre cet objet et le fond est inférieur (en valeur absolue) à ce contraste minimum, l'objet reste invisible. Au contraire, s'il est plus important, l'objet sera décelable. Ce contraste minimum dépend des conditions d'adaptation de l'œil de l'observateur et de la luminance du fond.

Le contraste est lié à la notion d'**écart de luminance** $\Delta L = L_o - L_f$. Le **seuil minimum de luminance décelable** ΔL_s est l'écart de luminance qui existe entre un objet en limite de visibilité et le fond. Le seuil minimum de luminance décelable est lié au contraste minimum par $C_s = \frac{\Delta L_s}{L_f}$ ou $\Delta L_s = C_s \times L_f$.

La **luminance d'adaptation** d'un automobiliste (L_{adap}) traduit les conditions lumineuses rencontrées par celui-ci. Elle est directement liée à l'importance du flux lumineux arrivant sur la rétine ainsi qu'à la vitesse à laquelle son intensité varie. La luminance d'adaptation constitue une évaluation du stimulus reçu qui gouvernera la capacité visuelle de l'œil. Lorsque le flux lumineux diminue rapidement, l'œil met un certain temps à s'adapter à ces nouvelles conditions. Par contre, l'œil est peu gêné par un accroissement de la luminosité ambiante, et dans ce cas il s'adaptera très rapidement.

Cette luminance d'adaptation dépend de la luminance des éléments présents dans le champ de vision, dont le tunnel et sa chaussée font partie, dans le cas d'un automobiliste. Il apparaît ainsi que la luminance d'adaptation d'un automobiliste arrivant dans un tunnel est directement liée à la luminance de la chaussée, qui dépend elle-même des niveaux d'éclairement installés.

2.2 Caractérisation des obstacles et de l'installation.

Dans la réalité, les obstacles potentiels sont nombreux et peuvent prendre une multitude de formes et de couleurs. Ils sont en général sombres, comme par exemple une roue de secours, c'est-à-dire que leur coefficient de réflexion est inférieur à 0,3. Il est donc nécessaire de définir un obstacle type simple, suffisamment représentatif, qui permettra de définir une situation de référence pour la visibilité. Le modèle est souvent constitué par une cible verticale de 25 cm de haut, parfaitement diffusante et de coefficient de réflexion ρ_{obj} pouvant prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 0,3 ou 0,4. Le problème consistera à assurer la détection de cette cible par un automobiliste tout au long de la traversée de l'ouvrage.

Les performances de l'installation d'éclairage du tunnel seront traduites au niveau de la luminance résultante de la chaussée (L_{ch}) et de la luminance de la cible à détecter (L_{obj}). La luminance de la chaussée L_{ch} dépendra des caractéristiques photométriques de la chaussée (avec son coefficient de clarté ρ_{ch}) et de l'éclairement horizontal E_h . La transformation entre le niveau de la luminance de chaussée et l'éclairement horizontal reçu par celle-ci est faite grâce à la formule $L_{ch} = \rho_{ch} \times \frac{E_h}{\pi}$. La

luminance de la cible sera calculée par la formule de Lambert $L_{obj} = \rho_{obj} \times \frac{E_v}{\pi}$ où E_v est l'éclairement vertical arrivant sur la cible présentée face à l'automobiliste.

Le rapport $p = \frac{L_{ch}}{E_v}$ est introduit et appelé **paramètre de qualité de contraste**. Il est utile pour caractériser l'installation et introduire une relation entre la luminance de la chaussée et l'éclairement vertical. Les paramètres de qualité de contraste changent avec la quantité de lumière émise en direction de la cible, c'est-à-dire dans le sens du déplacement de l'automobiliste. A luminance de chaussée constante, plus cette quantité est faible, plus l'éclairement vertical diminue, et donc plus le paramètre de qualité de contraste augmente. Il s'ensuit une classification qui distingue les installations dites **symétriques** des installations dites à **contre flux**. Les premières envoient une quantité égale de lumière en direction de l'automobiliste et dans le sens opposé, alors que les secondes privilégient la direction de l'automobiliste.

Les caractéristiques photométriques du revêtement traduisent le fait qu'une chaussée sera plus ou moins spéculaire et plus ou moins sombre. Ces caractéristiques sont utilisées pour en déduire le coefficient de clarté à utiliser pour dimensionner une installation. En effet le coefficient de clarté est égal au rapport multiplié par π , de la luminance L_{ch} de la chaussée à l'éclairement horizontal E_h .

$$\rho_{ch} = \pi \times \frac{L_{ch}}{E_h}$$

Il dépend du système d'éclairage (symétrique ou à contre flux), de la position des luminaires (dans l'axe des voies de circulation ou en piédroit), de leur inter-distance et des caractéristiques de la chaussée. Les caractéristiques d'un revêtement vont évoluer très rapidement depuis l'état neuf sous l'effet du trafic routier qui va user le liant et faire apparaître les granulats avant de se stabiliser au bout de quelques mois. Le projet devra tenir compte de l'évolution prévisible de la chaussée. Il faut donc pouvoir anticiper les caractéristiques de la chaussée en exploitation.

La CIE [12] fournit une classification des chaussées en quatre classes R1 à R4, allant d'une chaussée diffusante (R1) à une chaussée spéculaire (R4). La clarté de la chaussée est traduite par un coefficient de luminance noté Q_0 qui représente approximativement à π près le coefficient de clarté

de la chaussée éclairée par un ciel homogène. La luminance d'une chaussée, placée dans des conditions données d'éclairage, dépendra de sa spécularité, donc de son appartenance à une des classes CIE, et sera directement proportionnelle à ce coefficient de luminance Q_0 .

Il y a donc un décalage entre les projets qui devront utiliser les caractéristiques prévisibles au bout de quelques mois d'utilisation, et les réalisations dont les réceptions sont faites avec une chaussée non usée et souvent excessivement spéculaire.

2.3 Quels sont les phénomènes subis par un conducteur?

2.3.1 L'adaptation spatiale.

La capacité visuelle du conducteur est gouvernée par les conditions de luminosité présentes dans son champ de vision. Plusieurs études sur les relations existant entre la capacité visuelle d'un observateur à distinguer une cible et les conditions de luminosité ont été réalisées. Elles ont conduit à établir des lois mathématiques qui prédisent le contraste minimum, ou ce qui est équivalent la valeur du seuil minimum de luminance, qui doivent exister entre un objet et son arrière plan pour qu'il soit détectable, en fonction de l'environnement lumineux existant. L'importance de ce dernier est estimée au moyen de la luminance d'adaptation L_{adap} du conducteur. Les lois sont de deux types: soit elles permettent de connaître le contraste minimum perceptible C_s en fonction de la luminance d'adaptation L_{adap} , soit elles estiment la valeur du seuil minimal perceptible ΔL_s en fonction de ce même paramètre.

La détection d'une cible type sera assurée lorsque le contraste existant entre la cible et la chaussée proche sera suffisamment important pour que l'automobiliste le perçoive. En particulier, il doit être supérieur à la valeur du contraste minimum décelable imposé par les conditions lumineuses et fourni par les lois mathématiques précédentes. Le contraste réel dépend des quantités de lumière arrivant sur la cible et sur la chaussée avoisinante et donc des niveaux de l'éclairage horizontal E_h et de l'éclairage vertical E_v que l'installation d'éclairage fournira. Ces éclairages seront adaptés de manière à placer la cible type à la limite de la visibilité. Ils constituent le lien qui existe entre l'environnement lumineux (et donc la capacité visuelle d'un conducteur) et les obstacles à détecter.

Le problème se résume à adapter les niveaux d'éclairage et la luminance de chaussée afin que le contraste entre un obstacle potentiel et la chaussée soit égal au moins au contraste minimum théorique calculé par les lois mathématiques. Lorsque les niveaux d'éclairage de la chaussée permettront de déceler cet obstacle type, l'adaptation spatiale sera alors considérée comme réalisée.



photo n°2: Détection de cibles posées au sol.

2.3.2 L'adaptation temporelle.

Il existe un second phénomène à prendre en compte. L'oeil de l'automobiliste ne s'adapte pas immédiatement aux variations rapides de la luminosité. Il apparaît un décalage entre la capacité visuelle de l'automobiliste et l'environnement lumineux lorsque ce dernier évolue trop rapidement. A un instant donné, l'oeil du conducteur est adapté aux conditions qui existaient quelques fractions de secondes auparavant. Si le tunnel apparaît trop sombre, on parle d'effet de "trou noir" dans lequel la détection d'un obstacle est rendue difficile. Des études ont permis de déterminer les conditions limites d'évolution de l'environnement lumineux et d'établir des lois mathématiques pouvant être mises en oeuvre.

La luminance d'adaptation d'un conducteur L_{adap} devra évoluer en respectant une loi de décroissance maximale admissible. Dans les projets, il faut alors veiller à ce que l'installation d'éclairage rende les changements acceptables afin que le conducteur ne soit pas gêné par l'effet de trou noir. Dans ces conditions, les changements de niveau de la luminance d'adaptation ne pénalisent pas le conducteur: l'adaptation temporelle est assurée.



photo n°3: Exemple d'entrée sombre.

2.4 Les lois existantes pour résoudre l'adaptation spatiale [5].

Les résultats des expériences sur la visibilité sont exprimés entre autres grâce à deux lois [5]: la loi RCS et la loi d'ADRIAN [7].

2.4.1 La loi RCS.

La loi RCS (Relative Contrast Sensitivity) établie par BLACKWELL permet de calculer le contraste minimum décelable en fonction de la luminance du fond [6].

Cette loi RCS a été établie en demandant à des observateurs de préciser s'ils pouvaient déceler une cible de taille et de luminance données, placée au milieu d'un écran de luminance uniforme variable. La taille de cet écran était suffisamment grande pour occuper la majeure partie du champ visuel des observateurs et permettre ainsi d'assimiler sa luminance à la luminance d'adaptation des observateurs.

Ces expériences ont permis de déterminer des valeurs de contraste de seuil fonctions de la luminance de l'écran en deçà desquels 50 % des observateurs étaient dans l'incapacité de percevoir la cible.

Ces expériences ont été faites en utilisant comme paramètres entre autres les dimensions de l'objet, l'âge des observateurs et le temps de détection, et comme variable la luminance de l'écran. Pour chacun des paramètres, les résultats de ces expériences ont été notés sous forme de courbes qui

indiquaient l'inverse du contraste minimal nécessaire pour que la cible soit détectable par 50 % des observateurs en fonction de la luminance de fond. Ces courbes ayant une forme voisine, une courbe standard a été retenue par la CIE: Elle correspond à la détection en 0,2 seconde d'un disque de 4' de diamètre apparent, soit de 12 centimètres de haut à 100 m.

La loi RCS permet de calculer le contraste minimum décelable par une relation du type :

$$RCS(L_f) = \frac{K}{C_s}$$

où L_f est la luminance de l'écran ou du fond, K est un paramètre dépendant de la taille de la cible et de la durée d'exposition de celle-ci ($K=5,74$ pour un disque de 4' vu en 0,2 s), et C_s est le contraste minimum décelable dans ces conditions.

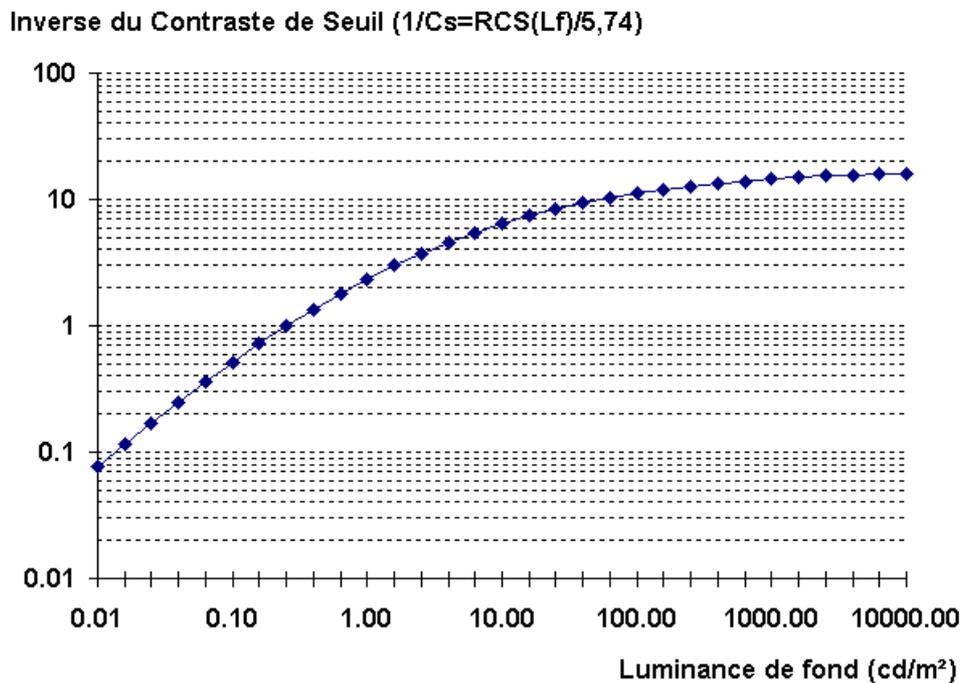


figure 1: Inverse du contraste de seuil déduit de la loi RCS (détection d'une cible de 4' de diamètre apparent en 0,2 seconde)

La formulation mathématique de la loi RCS est la suivante:

$$RCS(L_f) = \frac{K}{C_s} = 100 \times \left[\left(\frac{1,675}{L_f} \right)^{0,4} + 1 \right]^{-2,5}$$

A partir de la courbe précédente, il est possible de déduire la courbe pour une taille de cible différente, en utilisant la loi de RICCO qui traduit pour une luminance de fond donnée et pour une taille angulaire faible, la variation du contraste minimal décelable en fonction de la taille apparente de la cible, lorsque celle-ci reste faible. La loi de RICCO se traduit par une loi $C_s \times \epsilon^2 = \text{Constante}$ où ϵ est la taille angulaire de la cible.

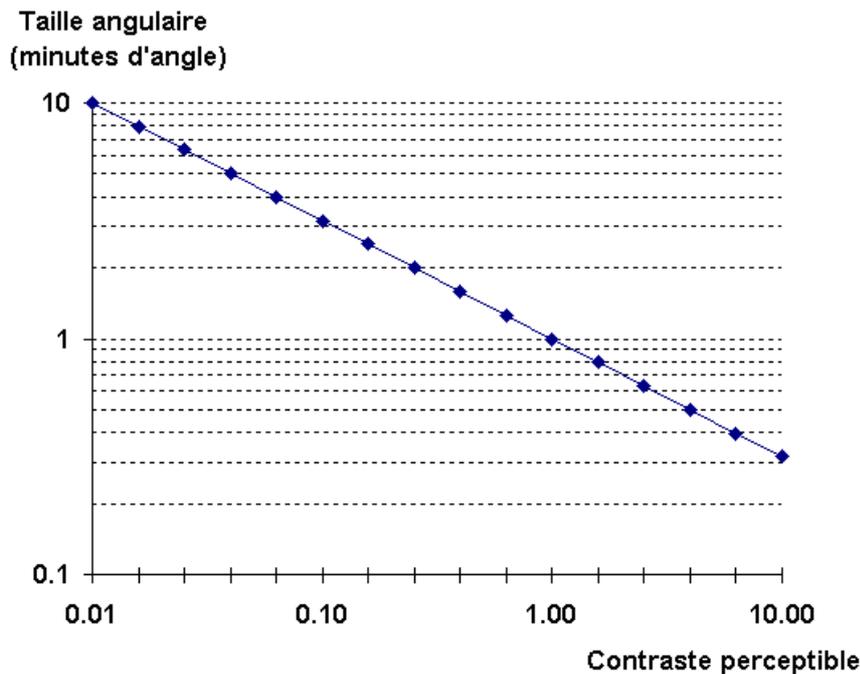


figure 2: La loi de RICCO

La formulation de la loi de RICCO montre l'importance de la taille angulaire de la cible dans la visibilité de celle-ci. La taille angulaire ϵ est inversement proportionnelle à la distance d'observation. La loi de RICCO peut donc s'écrire $C_s/d^2 = \text{Constante}$. **Cette formulation montre que lorsque la distance d'observation d'une cible est doublée, le contraste minimum nécessaire à sa détection est multiplié par 4.**

2.4.2 La loi d'ADRIAN.

L'autre loi utilisable a été établie par ADRIAN d'après une expérimentation semblable à celle ayant conduit à l'établissement de la loi RCS : une cible de dimension réduite devait être détectée sur un écran de taille importante. Ces expériences toutefois, cherchaient à déterminer l'écart de luminance qui devait exister entre la cible et l'écran pour que la quasi totalité d'une population d'observateurs (et non plus 50 %) distingue cette cible. Elles différaient des précédentes dans la mesure où au lieu de traiter des réponses « cible vue » ou « cible non vue », ces expériences ajustaient les luminances aux valeurs qui rendaient la cible détectable pour chacun des observateurs. Les conclusions de ces études se présentent sous la forme d'une fonction qui donne un seuil minimal de luminance toujours détectable en fonction de la luminance du fond, et qui introduit de nombreux paramètres tels que : taille de la cible, âge de l'observateur, durée d'exposition ou encore polarité du contraste (positif ou négatif).[7].

Le seuil minimal détectable représente l'écart de luminance minimal qui doit exister entre la luminance de la cible et celle du fond afin que cette cible puisse être détectée. Le contraste de seuil c'est-à-dire le contraste minimal décelable est obtenu en divisant la valeur du seuil de luminance décelable par la valeur de la luminance du fond.

La formulation mathématique de la loi d'ADRIAN est complexe. Elle se présente sous la forme

d'une fonction qui est le produit d'une fonction principale par plusieurs facteurs correctifs. La fonction principale indique l'écart minimal de luminance décelable pour des conditions types où la taille de l'objet et la luminance de fond sont les seuls paramètres. Elle est corrigée pour tenir compte des paramètres secondaires tels que âge de l'observateur, durée d'exposition et contraste, par des facteurs multiplicatifs qui sont eux-mêmes des fonctions valant 1 lorsque les conditions sont idéales, c'est-à-dire lorsque l'observateur est âgé de 20 ans, lorsqu'il peut observer la scène plus de 2 secondes et lorsque la cible est en contraste positif. Le facteur correctif pour un contraste négatif est inférieur à 1 car la cible est alors plus facilement détectable. Les autres facteurs, dans d'autres conditions, sont supérieurs à 1 car l'écart minimal détectable devient plus important.

La formulation mathématique complète est indiquée dans le document [7].

Dans le cas des tunnels (où la luminance de la chaussée est supposée être supérieure à 0,6 cd/m²), la formule utilisée pour la fonction principale ΔL est:

en notant:

$$\Phi = \log(4,1925 \times L_f^{0,1556}) + 0,1684 \times L_f^{0,5867} \text{ et } L = 0,05946 \times L_f^{0,466}; \text{ alors}$$

$$\Delta L(L_f, \alpha) = 2,6 \times \left(\frac{\Phi}{\alpha} + L \right)^2 \text{ cd / m}^2 \text{ où:}$$

L_f est la luminance du fond et α est la taille angulaire en minute de la cible à détecter.

$\Delta l(t)$ l'écart de luminance pour une durée d'exposition est obtenu en multipliant l'écart précédent par un facteur correctif obtenu de la manière suivante:

en notant :

$$a(\alpha) = 0,36 - 0,0972 \times \left(\frac{(\log(\alpha) + 0,523)^2}{(\log(\alpha) + 0,523)^2 - 2,513 \times (\log(\alpha) + 0,523) + 2,7895} \right) \text{ et}$$

$$a(L_f) = 0,36 - 0,0972 \times \left(\frac{(\log(L_f) + 6)^2}{(\log(L_f) + 6)^2 - 10,4 \times (\log(L_f) + 6) + 52,28} \right);$$

$$a(\alpha, L_f) = \frac{[a(\alpha)^2 + a(L_f)^2]}{2,1};$$

$$\Delta L(t) = \Delta L \times \frac{a(\alpha, L_f) + t}{t} \text{ où:}$$

t est la durée d'exposition (toutefois inférieure à 2 secondes).

Le contraste négatif sera pris en compte en multipliant le seuil précédent par le facteur $F_{cp}(a, L_f)$:

$$F_{cp}(\alpha, L_f) = 1 - \frac{m \times \alpha^{-\beta}}{2,4 \times \Delta L_{(t=2s)}} \text{ où:}$$

$$m = 10^{-10 - (0,125 \times (\log(L_f + 1))^2 + 0,0245)} \text{ et } \beta = 0,6 \times L_f^{-0,1488}.$$

La correction due à l'âge des observateurs sera faite en multipliant l'écart de seuil par le facteur noté

AF:

$$AF = \frac{(Age - 19)^2}{2160} + 0,99$$

En résumé:

en reprenant les notations précédentes et si C indique la polarité du contraste:

$$\Delta L(\alpha, L_f, t, C, age) = 2,6 \times \left[\frac{\Phi}{\alpha} + L \right]^2 \times F_{cp} \times \frac{a(\alpha, L_f) + t}{t} \times AF$$

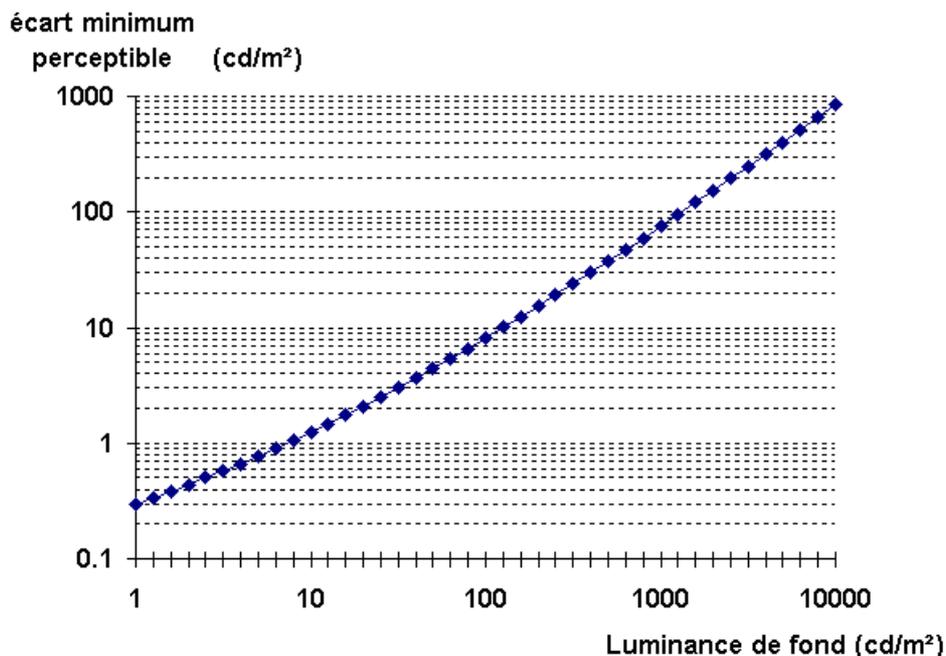


figure 3: La loi d'ADRIAN pour un observateur âgé de 20 ans, devant détecter une cible de 4' de diamètre apparent, en 0,2 seconde.

2.4.3 Choix d'une loi pour le dimensionnement de l'éclairage.

Bien que les expériences apparaissent équivalentes, les deux lois conduisent tout de même à des résultats légèrement différents.

En premier lieu, les valeurs obtenues par la formulation mathématique de la loi RCS sont applicables à 50 % d'une population d'observateurs d'âge variable, alors que le modèle d'ADRIAN est valable pour une large majorité d'une population d'âge donné. Cela implique que la validité des résultats obtenus avec la loi RCS est assurée pour 50 % d'une population statistiquement identique à celle qui a permis l'obtention de ces résultats, qui n'est pas a priori celle composée des

conducteurs automobiles. Au contraire les calculs effectués avec la méthodologie d'ADRIAN s'appliqueront à la totalité des conducteurs d'âge égal à celui utilisé comme paramètre ainsi qu'aux plus jeunes. L'emploi de cette méthode nécessite donc la définition d'un conducteur représentatif de l'ensemble des automobilistes et des conditions dans lesquelles la cible type doit pouvoir être décelée, en particulier le temps moyen mis par le conducteur pour la découvrir.

Les écarts de luminance de seuil obtenus en utilisant les résultats de la loi d'ADRIAN peuvent être comparés à ceux obtenus par la loi RCS (cf figure 4). La prise en compte de l'âge des observateurs dans la méthode préconisée par ADRIAN est faite en multipliant la valeur du seuil obtenu pour un observateur de 20 ans par un facteur dépendant de l'âge. Cela revient à décaler les courbes tracées pour un âge donné dans des figures à échelle logarithmique. L'examen des résultats obtenus avec la méthode d'ADRIAN montre qu'un observateur âgé de 20 ans pourra déceler des cibles ayant un écart de luminance divisé par 2 par rapport à quelqu'un âgé de 60 ans. La superposition des courbes montre que les lois RCS et d'ADRIAN varient sensiblement de la même manière. Toutefois comme l'écart entre la courbe RCS et les courbes d'ADRIAN n'est pas constant, cela montre une différence de sensibilité entre les deux formulations due sans doute à la dispersion des données utilisées pour définir la loi RCS.

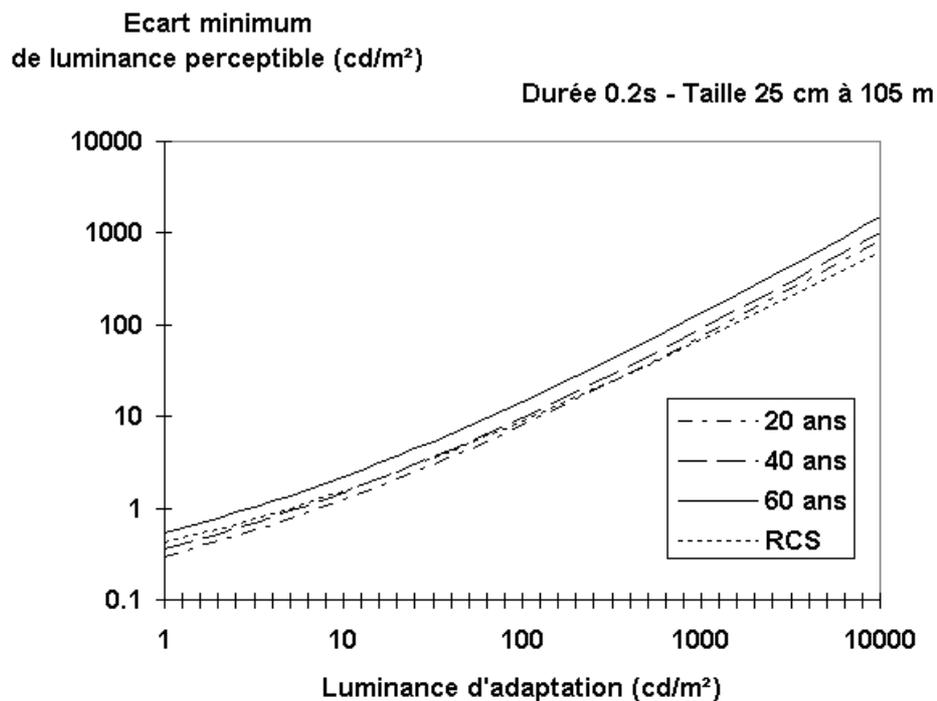


figure 4: Comparaison des écarts de luminance de seuil obtenus avec la loi RCS et la loi d'ADRIAN (observateurs de 20, 40 et 60 ans).

La comparaison montre que la courbe obtenue grâce à la méthode d'ADRIAN en utilisant un observateur de 40 ans est pour une luminance supérieure à 15 cd/m² au-dessus de la courbe établie avec la loi RCS valable pour 50 % des observateurs. Lorsque la luminance est inférieure à 15 cd/m², les courbes restent très proches l'une de l'autre. Cela permet d'envisager d'utiliser dans ces conditions les lois d'ADRIAN dans la méthode de dimensionnement en considérant que l'automobiliste de 40 ans est soit représentatif de l'ensemble des conducteurs, soit que ses capacités visuelles sont telles que tout obstacle type détecté dans la zone de renforcement par ce conducteur le

sera par 50 % de la population dans les mêmes conditions.

Les lois d'ADRIAN nécessitent comme autre paramètre la durée d'exposition de la cible qui sera assimilée ici au temps maximum admissible de détection de la cible type posée au sol. Cette durée a été fixée dans la suite à 1 seconde. Elle est légèrement inférieure par sécurité au temps de réaction pris en compte dans le calcul des distances d'arrêt.

Dans des conditions données, lorsqu'un conducteur âgé de 40 ans peut détecter une cible en 1 seconde, un jeune conducteur de 20 ans le fait en 0,8 seconde, et un automobiliste de 60 ans en 1,5 seconde.

Les études d'ADRIAN ont de plus montré que les cibles en contraste négatif étaient plus facilement perçues que les cibles de même contraste mais positif.

Or en tunnel, les objets de coefficient de réflexion faible (qui représentent la majorité des obstacles) sont systématiquement vus en contraste négatif.

En effet la luminance de la cible sera calculée grâce à la loi de Lambert: $L_{obj} = \rho_{obj} \times \frac{E_v}{\pi}$. En

utilisant le paramètre de qualité de contraste $p = \frac{L_{ch}}{E_v}$, on obtient $E_v = \frac{L_{ch}}{p}$, donc $L_{obj} = \rho_{obj} \frac{L_{ch}}{p \times \pi}$

soit $\frac{L_{obj}}{L_{ch}} = \frac{\rho_{obj}}{p \times \pi}$. Les objets vus en contraste négatif vérifient $\frac{L_{obj}}{L_{ch}} < 1$, soit $\rho_{obj} < p \times \pi \approx 0,31$ dans

le cas extrême où le paramètre de qualité de contraste p est égal à 0,1, ce qui représente la limite inférieure de ce qui existe en tunnel. Dans tous les cas rencontrés en tunnel, une cible type de coefficient de réflexion de 0,3 ou moins sera vue en contraste négatif. Le fait d'indiquer que la cible doit être détectée en contraste négatif entraîne une légère diminution des niveaux d'éclairement nécessaires, car la perception de la cible type sera facilitée. La loi d'ADRIAN permet d'utiliser cette possibilité, contrairement à la loi RCS qui ne distingue pas le contraste positif du contraste négatif.

En résumé, la détermination des seuils de luminance perceptibles utilisera la loi d'ADRIAN, paramétrée pour un automobiliste de 40 ans devant détecter une cible verticale posée au sol en 1 seconde.



Photo n°4: résolution de l'adaptation spatiale.

2.5 Les modèles mathématiques de résolution de l'adaptation temporelle.

Des études ont été faites par DE BOER et SCHREUDER pour connaître la capacité d'adaptation d'un observateur à des variations rapides de son environnement lumineux.

2.5.1 Les expériences de DE BOER [8].

La première expérience consistait à modifier brutalement la luminance d'un fond uniforme. La valeur initiale de la luminance de fond était de 8000 cd/m^2 . La luminance finale diminuait d'un facteur 3 à 40 par rapport à la valeur initiale. Cette expérience concluait que 75 % des observateurs acceptaient un saut d'un facteur inférieur à 5,5, c'est-à-dire qu'ils estimaient ne pas être gênés par la diminution rapide de la luminance du fond tant que celle-ci restait dans ces limites. La gêne pouvait se traduire par l'apparition d'image accidentelle ou bien de tache de couleur.

Dans un second temps, des observateurs adaptés à une luminance de fond de 8000 cd/m^2 étaient soumis à un saut de luminance d'un facteur 5, donc acceptable en vertu de l'expérience précédente. Ils devaient ensuite réduire eux-mêmes le niveau de luminance de manière à ne ressentir aucune gêne et de manière à distinguer constamment un carré de taille et de contraste donnés. Les essais révélèrent que le critère de confort était déterminant jusqu'à 100 cd/m^2 , et qu'ensuite la visibilité du carré devenait le facteur prédominant.

La figure suivante montre les résultats obtenus pour la décroissance admissible de la luminance de fond par 50 % et par 75 % des observateurs.

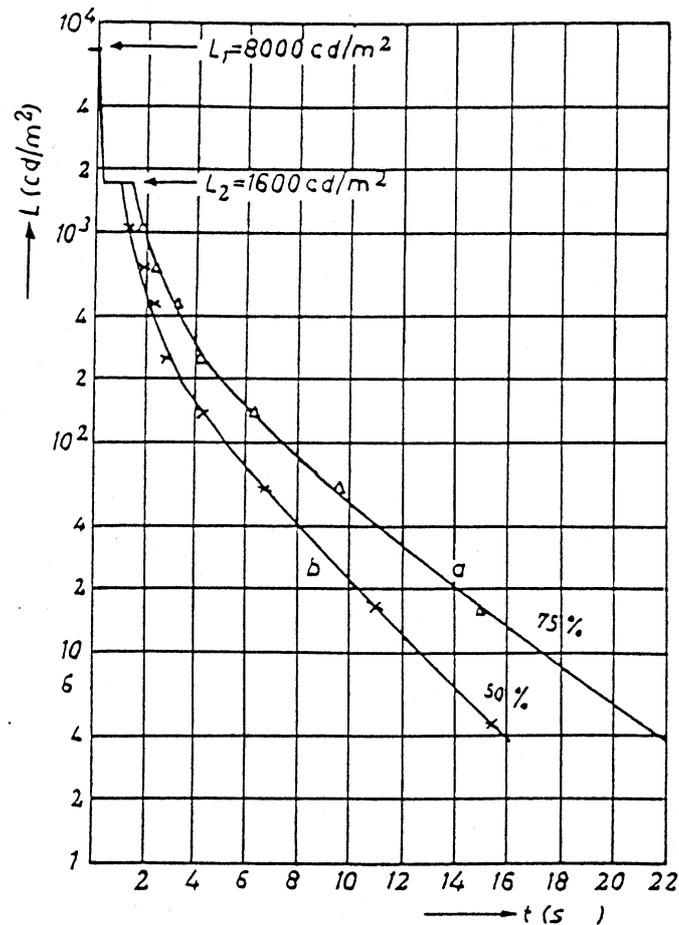


figure 5: La loi de décroissance admissible de DE BOER

2.5.2 Les expériences de SCHREUDER [9].

Deux séries d'expériences ont été faites. La première série estimait la durée nécessaire pour qu'un observateur ayant subi une forte diminution de la luminance de son champ de vision retrouve des conditions de vision supportables. Pour cela les observateurs étaient placés devant un écran dont la luminance diminuait brutalement de 8000 cd/m^2 à 13 cd/m^2 . Les observateurs devaient alors indiquer à quel moment la gêne devenait supportable.

La seconde série était destinée à étudier la vitesse et l'allure de la décroissance admissible de la luminance du champ de vision. Des observateurs étaient placés devant un écran dont ils pouvaient régler la luminance. Ils devaient faire décroître la luminance de l'écran d'un niveau de 8000 cd/m^2 à 4 cd/m^2 le plus rapidement possible sans être gêné.

Les deux expériences conduisent à des résultats proches. La courbe contenue dans la figure suivante indique la décroissance admissible par 75 % des observateurs lors de la deuxième expérience. Le point 1 est le résultat de la première expérience (correspondant à une luminance de fond de 13 cd/m^2).

Le point 2 est obtenu par une troisième expérience effectuée sur une maquette simulant l'approche d'un tunnel par un conducteur. La luminance "extérieure" était de 5000 cd/m^2 et décroissait plus ou

moins rapidement jusqu'à une valeur de 10 cd/m^2 . Les observateurs devaient indiquer s'ils ressentiaient une gêne et si elle était supportable ou non. Le point 2 représente la durée de transition considérée comme acceptable par 75 % des sujets. Les différentes expériences conduisent à des résultats concordants.

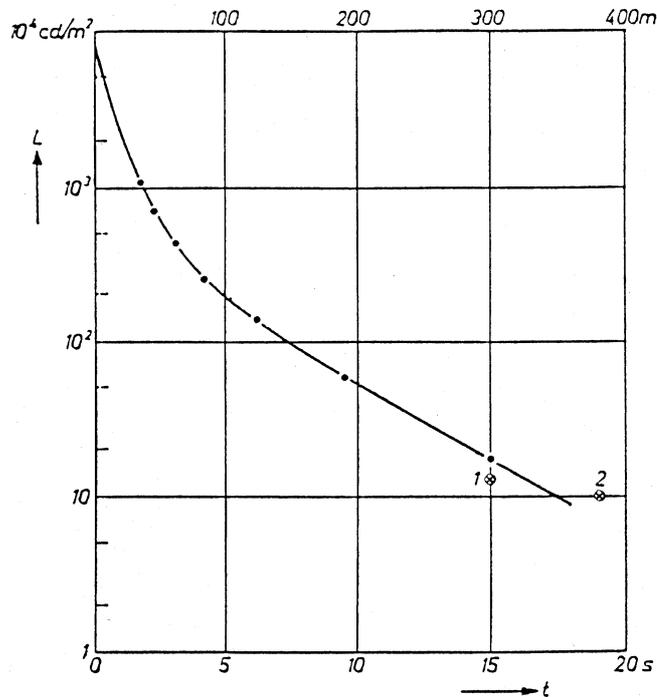


figure 6: Résultats des expériences de SCHREUDER

Le Dr SCHREUDER a ensuite comparé dans son article ses propres résultats avec ceux de KABAYAMA qui, à partir d'une installation proche de sa propre maquette, a étudié l'influence du niveau de la luminance initiale. Ce dernier a étudié les variations admissibles de la luminance d'adaptation en fonction des différentes valeurs de préadaptation. Lorsque les courbes de décroissance admissible qu'il a obtenues sont ramenées à une échelle commune puis superposées, on obtient alors un faisceau étroit de courbes proches. KABAYAMA conclut que le niveau initial de la luminance du fond influe peu sur sa décroissance relative. SCHREUDER a superposé ses propres courbes obtenues pour des décroissances admissibles par 75 % et par 50 % des observateurs. Elles s'intègrent parfaitement au faisceau de courbes. La figure suivante montre la superposition effectuée: les courbes 7 et 8 ont été obtenues par SCHREUDER et les autres courbes par KABAYAMA.

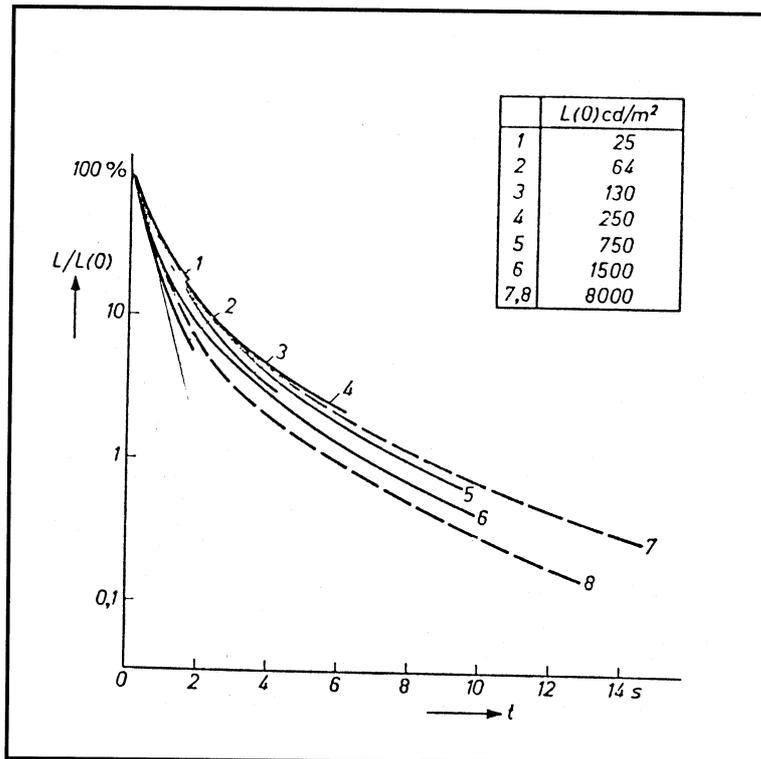


figure 7: Superposition des décroissances admissibles.

2.5.3 Comparaison des résultats des expériences des professeurs DE BOER et SCHREUDER.

Les différentes décroissances admissibles obtenues d'une part par DE BOER, et d'autre part par SCHREUDER peuvent être comparées.

Le tableau suivant indique pour chacune des méthodes les valeurs obtenues par lecture directe sur les graphiques.

t en secondes	DE BOER cd/m ²	SCHREUDER cd/m ²	Ecart en %
0	8000	8000	0
2	1000	1000	0
4	300	269	10,3
6	145	140	3,4
8	86,8	81,4	6,2
10	51,8	51,6	0,4
12	30,8	32,7	6,2
14	19,9	21	5,6
16	12,4	13,4	8,0

Ces mesures montrent une très bonne similitude entre les deux courbes (coefficient de corrélation 0,99).

2.5.4 Conclusions de ces études.

Les différentes études faites sur la décroissance admissible de la luminance d'adaptation conduisent à des résultats proches. Il apparaît que la décroissance admissible de la luminance d'adaptation (au moins en laboratoire) peut être obtenue au moyen d'une courbe générale. **Elle indiquera le pourcentage admissible de baisse de la luminance en fonction de la durée écoulée depuis le début de la décroissance.**

2.5.5 Détermination d'une fonction de décroissance admissible.

Le faisceau obtenu par la superposition sur un même graphique des courbes de décroissance admissible résultant des différentes expériences permet de définir une courbe moyenne d'expression mathématique $f(t)$.

La fonction $f(t)$ sera approchée par:

$f(t) = 10^{1 / (b + a \times t) + c}$ en début de décroissance puis par $f(t) = 10^{dx + t + e}$ où a , b , c , d et e sont des coefficients à déterminer.

En utilisant approximativement la courbe 6 on obtient:

$a=0,175$;
 $b=0,414$;
 $c=-2,411$;

$d=-0,1$;
 $e=-1,138$.

Les deux courbes se coupent pour $t=5,186$ s.

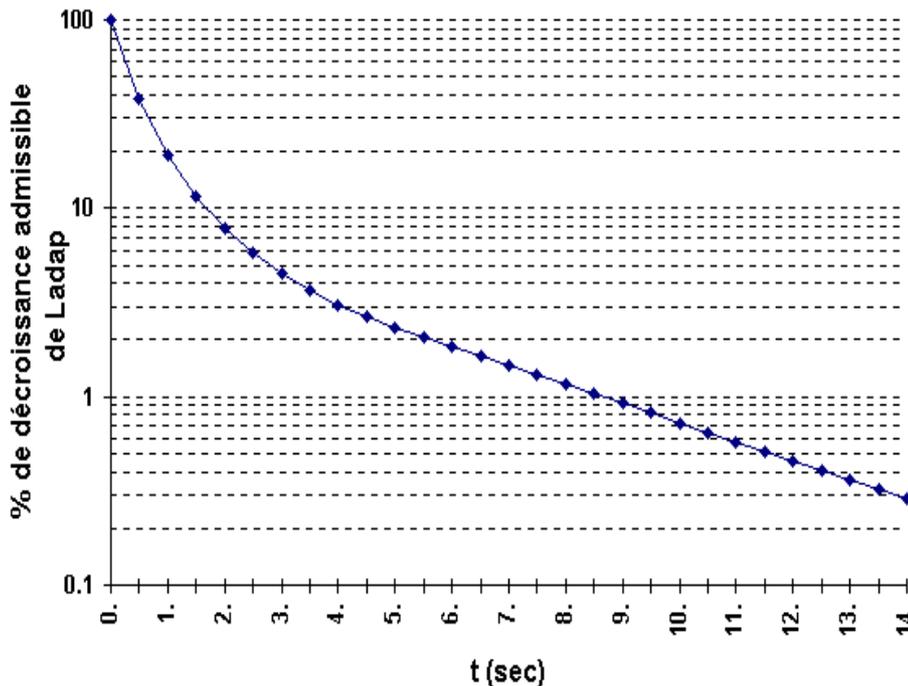


figure 8: Fonction utilisée pour vérifier l'adaptation temporelle

2.6 Les conditions réelles : introduction des voiles parasites.

Les lois décrites ci-dessus sont issues de résultats d'expériences de laboratoire, pour lesquelles la luminance d'adaptation était connue et facilement mesurable: elle était égale à la valeur de la luminance de l'écran qui servait de fond. **Dans la réalité, un automobiliste rencontre un paysage comportant des zones de luminances variées.** Le passage des conditions de laboratoire aux conditions réelles a été étudié afin d'étendre la validité des lois.

Il faut mentionner deux types d'expériences qui ont cherché à estimer l'influence de la non-homogénéité du paysage.

La première série d'expériences faisait varier la taille du fond entourant la cible de 2 à 20 degrés. Les résultats montrèrent que les conditions de visibilité restaient stables car la rétine d'un observateur est principalement sensible au champ de vision central ([10] p 88). Le facteur principal influençant la luminance d'adaptation est la luminance moyenne dans un cône étroit de 2° d'ouverture, d'axe identique à celui du regard.

La seconde série d'expériences a consisté à introduire une ou plusieurs sources parasites dans le fond, autour de la cible à détecter ([10] p 102, [11]).

Deux conclusions ont été tirées de ces expériences: d'une part l'introduction d'une source parasite autour du champ de vision central peut être prise en compte en rajoutant à la luminance de fond existante une luminance parasite proportionnelle à l'inverse du carré de l'angle entre l'axe de visée et la position de la source, et d'autre part, si plusieurs sources sont présentes simultanément dans le champ de vision, leurs effets s'ajoutent.

Ainsi l'influence du paysage, hors du champ de vision central, peut être estimée en sommant l'influence de chaque partie élémentaire le constituant, ces parties étant considérées comme sources parasites ponctuelles. C'est la définition mathématique du voile de FRY.

Ces résultats sont à l'origine de l'introduction du voile de FRY, qui permet ainsi d'une part de tenir compte la non-homogénéité du paysage, et d'autre part d'utiliser dans des conditions réelles des lois établies en laboratoire. Le passage des conditions de laboratoire aux conditions réelles se fait en rajoutant à la luminance du fond servant d'étalon une luminance parasite dite de FRY.

La luminance d'adaptation L_{adap} d'un observateur peut donc être estimée par la formule:

$$L_{\text{adap}} = L_{2^\circ} + L_{\text{FRY}}$$

où L_{2° est la luminance moyenne dans le cône de 2° représentant le champ de vision central, et L_{FRY} est la luminance de voile parasite introduite pour prendre en compte l'éblouissement dû au paysage.

Dans le cas d'un automobiliste toutefois, la vision est perturbée par les milieux traversés par la lumière. Les rayons lumineux traversent la couche d'air existant entre le point regardé et l'œil, et le pare brise du véhicule. En effet la présence d'une couche d'air et celle du pare brise des véhicules devant l'observateur permettent à une partie de la lumière d'être diffusée dans toutes les directions, en particulier vers sa rétine, augmentant ainsi la quantité de lumière participant à l'adaptation. Ce phénomène est quantifié grâce au voile atmosphérique et au voile de pare brise (notés L_{atm} et L_{pb}). Une partie de la lumière est absorbée par cette masse d'air, une autre l'est par le pare brise, ce qui diminue la luminance des éléments présents devant l'observateur. Deux facteurs de transmission (T_{pb} pour le pare brise et T_{atm} pour l'atmosphère) sont introduits pour prendre en compte ces absorptions. La luminance d'adaptation de l'automobiliste devient donc :

$$L_{\text{adap}} = T_{\text{atm}} \times T_{\text{pb}} \times (L_{2^\circ} + L_{\text{fry}}) + T_{\text{pb}} \times L_{\text{atm}} + L_{\text{pb}}$$



photo n°5: Présence de voile atmosphérique.

2.7 La résolution du problème de l'adaptation spatiale.

Pour résoudre les problèmes soulevés par l'adaptation spatiale et l'adaptation temporelle, l'approche d'un automobiliste arrivant dans un tunnel à une certaine vitesse est simulée. Pour chacune des positions successives du véhicule l'adaptation spatiale est résolue en calculant le niveau nécessaire de la luminance de chaussée pour que soit détecté un obstacle éventuel à la distance de sécurité. Cette distance à laquelle l'obstacle est sensé être présent, est en principe prise égale à la distance d'arrêt imposée par la vitesse autorisée prévue au projet.

Pour cela il faut déterminer la valeur de la luminance d'adaptation du conducteur à l'endroit considéré, afin d'obtenir le seuil minimal de luminance perceptible qui doit exister entre la chaussée et la cible. Ensuite, la luminance de la chaussée est déterminée de telle façon que la cible soit visible, c'est-à-dire que la luminance de cette dernière soit égale à celle de la chaussée moins la valeur déterminée précédemment. L'obstacle est considéré comme étant vu en contraste négatif.

L'adaptation temporelle sera résolue lorsque le niveau de la luminance d'adaptation du conducteur n'aura pas diminué trop vite et lorsqu'il sera compatible avec les limites imposées par toutes les situations qu'il a déjà traversées. Si les variations sont trop importantes, la luminance de la chaussée présente dans le champ de vision théorique sera augmentée suffisamment pour que la luminance d'adaptation du conducteur soit égale à la limite calculée.

2.7.1 Calcul de la luminance d'adaptation et des voiles parasites.

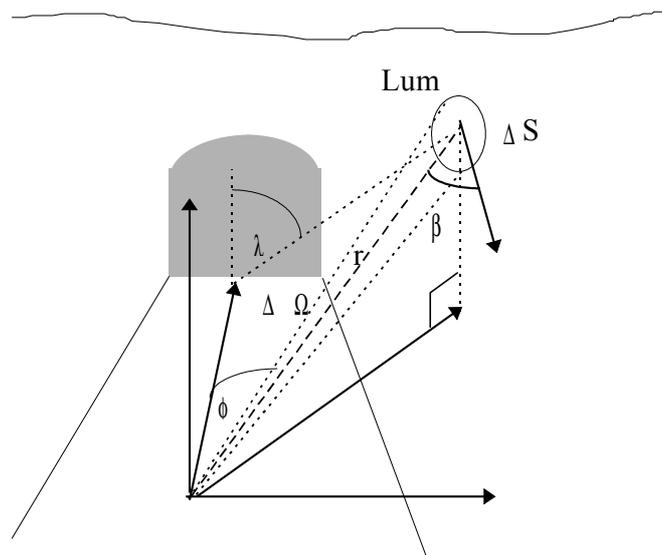
En vertu des résultats des expériences précédentes, la luminance d'adaptation est évaluée en calculant la luminance moyenne dans un cône étroit de 2 degrés d'ouverture, à laquelle différents voiles parasites sont rajoutés pour tenir compte des éléments traversés par la lumière et du paysage : le voile de pare brise L_{pb} , le voile atmosphérique L_{atm} et le voile de FRY L_{Fry} .

$$L_{adap} = T_{atm} \times T_{pb} \times (L_{2^\circ} + L_{fry}) + T_{pb} \times L_{atm} + L_{pb}$$

Voile de Fry.

Le voile de FRY peut être calculé de plusieurs manières possibles. En première approximation, il pourrait être considéré comme proportionnel à la luminance moyenne présente devant l'observateur $L_{Fry} = k \times L_{moy}$. Pour tenir compte de la faible influence des éléments éloignés de l'axe du champ de vision centrale, cette moyenne peut être prise sur un cône large qui représente la principale partie du champ de vision.

Plus précisément, ce voile est calculé à partir de la formule intégrale de FRY à partir des éléments descriptifs du tunnel.



L'intégrale de FRY est égale à:

$$0,00396 \times \int_{\phi=1^\circ}^{\phi=90^\circ} \int_{\lambda=0^\circ}^{\lambda=360^\circ} \frac{\text{Lum} \times \cos(\phi) \times \sin(\phi)}{\phi \times (\phi + 1/38,2)} \times d\phi d\lambda$$

où Lum est la luminance du point repéré par λ et ϕ , ϕ est la hauteur angulaire de la zone considérée au-dessus de l'axe du regard et λ l'angle dans un plan perpendiculaire à l'axe du regard entre la verticale et la direction de cette zone.

Lorsque le paysage est uniforme, c'est-à-dire que toutes les parties qui le composent ont une même luminance Lum, la valeur de l'intégrale précédente est égale à $0,074 \times \text{Lum}$.

Cette formule est remplacée dans le cas d'éléments surfaciques par

$$L_{\text{Fry}} = \sum \frac{\text{Lum} \times \Delta \Omega \times \cos(\phi)}{\phi \times (\phi + 1/38,2)} = \sum \frac{\text{Lum} \times \Delta S \times \cos(\phi) \times \cos(\beta)}{r^2 \times \phi \times (\phi + 1/38,2)}. \quad ([1] \text{ p } 45)$$

β est l'angle entre la normale à la surface et la direction de la pupille, $\Delta \Omega$ est l'angle solide sous lequel est vu l'élément surfacique ΔS par le conducteur.

D'autres formules existent :

$$L_{\text{fry}} = k \times \int \frac{dE(\phi, \lambda)}{\phi^2} = 0,0028 \times \int_{\phi=1^\circ}^{\phi=90^\circ} \int_{\lambda=0^\circ}^{\lambda=360^\circ} \frac{\text{Lum} \times \cos(\phi) \times \sin(\phi)}{\phi^2} \times d\phi d\lambda$$

avec $k=9,2$ si les angles sont en degrés.

E est l'éclairement en provenance de la zone considérée reçu par la pupille et ϕ la hauteur angulaire de la zone.

La méthode de la luminance moyenne présente l'avantage de la simplicité lorsque le paysage est relativement homogène. Mais comme le voile de Fry est un moyenne pondérée des luminances

présentes dans le champ de vision, il peut apparaître des différences significatives avec une estimation de ce voile par la valeur moyenne des luminances. En particulier lorsque des sources très lumineuses telles que le soleil ou le ciel sont visibles par l'automobiliste, tout en étant hors du cône retenu pour effectuer une moyenne. L'intensité de ces sources lumineuses peut être suffisamment importante pour que, malgré la pondération, leur effet se fasse sentir dans le voile de Fry. Dans le cas d'une estimation du voile de Fry par une luminance moyenne dans un cône donné, l'effet de ces sources ne sera pas pris en compte si elles ne sont pas présentes dans ce cône.

Ces différences sont sensibles notamment lorsque le ciel occupe une part importante du champ de vision (cas des tranchées couvertes), et lorsque le soleil traverse le champ de vision des conducteurs tout en restant haut dans le ciel (cas des tunnels orientés est-ouest et ou nord-sud avec une couverture peu épaisse).

D'autre part, les formules utilisées pour calculer le voile de Fry éliminent la partie centrale du champ de vision au contraire du calcul par la luminance moyenne dans un cône donné. Or la partie centrale du champ de vision est occupée, dans le cas de l'automobiliste, par le tunnel. Cette différence peut être sensible car le tunnel se distingue de son environnement, paraissant plus ou moins sombre selon l'importance de l'installation d'éclairage.

Voile atmosphérique et voile de pare brise :

A l'extérieur, les autres voiles sont estimés par des formules. Le voile atmosphérique extérieur est proportionnel à la couche d'air traversée, c'est-à-dire à la distance séparant le conducteur de l'entrée du tunnel. Il sera caractérisé par un coefficient de proportionnalité. Le voile de pare brise dépend étroitement du véhicule utilisé. Pour tenir compte de la diversité des véhicules, il sera pris en compte par une formule simplifiée. En règle générale ce voile est limité à une valeur maximale atteinte lorsque l'influence du tunnel est nulle, c'est-à-dire hors de la zone d'ombre due au relief. La longueur de cette zone est prise constante et égale à 50 mètres. Lorsque le véhicule est à une distance du tunnel inférieure à 50m, le voile de pare brise est considéré proportionnel à la distance à la tête. Le voile atmosphérique à l'intérieur du tunnel est toutefois calculé au moyen d'une intégrale, car il dépend de la valeur des éclairagements des couches d'air traversées successivement.

$$L_{atm} = \int_0^{\infty} \exp(-Ky) \times \frac{K \times \pi}{\rho_{ch} \times \Omega} \times Lum(y) dy$$

avec K facteur d'extinction de l'air intérieur, Ω caractéristique de diffusion des particules, ρ_{ch} le coefficient de réflexion de la chaussée, et Lum(y) la luminance de la chaussée située à une distance y de l'observateur ([1] p 44).

2.7.2 Caractérisation de l'installation.

La luminance finale de la chaussée du tunnel dépend, comme cela a été mentionné précédemment, de nombreux paramètres. En particulier, elle dépend principalement des caractéristiques photométriques de la chaussée, de la réalisation de l'installation et des caractéristiques des luminaires.

Or au stade de la détermination des niveaux de luminance de chaussée nécessaires, les caractéristiques précises de l'installation et de la chaussée ne sont pas encore connues, car elles seront déduites justement des niveaux à installer, des possibilités de réalisation et d'une optimisation

des coûts de fonctionnement et d'investissement.

Il faut donc dans un premier temps choisir les propriétés générales de l'installation qui se résument au type d'installation (symétrique ou à contre flux) et au type de la chaussée (éclaircie ou non, diffusante ou spéculaire). L'installation sera ainsi caractérisée par son paramètre de qualité de contraste p ($p = \frac{L_{ch}}{E_v}$), et la chaussée par son coefficient de clarté ρ_{ch} ($\rho_{ch} = \pi \times \frac{L_{ch}}{E_h}$).

Les hypothèses de calcul deviendront des contraintes pour la réalisation.

La résolution de l'adaptation spatiale consiste à assurer que le niveau de luminance de chaussée est suffisant pour qu'un obstacle type soit détecté, c'est-à-dire que sa luminance soit suffisamment éloignée de la luminance de chaussée. Pour cela les caractéristiques générales de l'installation d'éclairage sont utilisées. Le seuil minimal décelable est obtenu par les lois de la visibilité, en fonction des conditions rencontrées par l'automobiliste, et est utilisé pour déterminer le niveau de la luminance de chaussée nécessaire.

L'installation d'éclairage est caractérisée par son paramètre de qualité de contraste p qui est égal au rapport entre la luminance de la chaussée à un endroit donné L_{ch} et l'éclairement vertical E_v arrivant sur la face visible par le conducteur de l'obstacle à détecter $p = \frac{L_{ch}}{E_v}$.

A luminance de chaussée constante, plus ce paramètre est élevé, moins l'obstacle reçoit de lumière. Si ce dernier est vu en contraste négatif, ce qui est le cas général en tunnel, à luminance de chaussée constante son contraste avec la chaussée augmente. Donc un fort paramètre de qualité de contraste améliore la visibilité en augmentant les contrastes.

Si l'obstacle suit la loi de LAMBERT, sa luminance peut être calculée par $L_{obj} = \rho_{obj} \times \frac{E_v}{\pi}$. En

utilisant la définition du paramètre de qualité de contraste p , on obtient: $E_v = \frac{L_{ch}}{p}$, d'où on déduit:

$$L_{obj} = \frac{\rho_{obj} \times L_{ch}}{p \times \pi}$$

Par ailleurs, par définition du coefficient de clarté:

$$L_{ch} = \rho_{ch} \times \frac{E_h}{\pi}$$

La connaissance du paramètre de qualité de contraste p , du coefficient de réflexion de la cible théorique et du coefficient de clarté de la chaussée permettent de s'affranchir des autres caractéristiques de la chaussée, de l'installation d'éclairage et de la cible à détecter, et de déterminer ainsi les niveaux d'éclairement à fournir.

Les installations d'éclairage sont classées dans deux grandes familles: les installations dites symétriques (où p est de l'ordre de 0,15) dans lesquelles les luminaires envoient autant de lumière vers l'avant que vers l'arrière, et les installations à contre flux qui privilégient la direction de l'automobiliste (où p est en principe au minimum égal à 1). D'autres valeurs pour le paramètre de qualité de contraste sont possibles, mais les valeurs indiquées sont celles qui sont traditionnellement utilisées dans les calculs.

La valeur finale du paramètre de qualité de contraste p d'une installation tient compte des réflexions parasites sur les piédroits. L'éclairement vertical au niveau de la chaussée est en effet

égal à l'éclairage vertical provenant directement des appareils d'éclairage et de la réflexion sur la chaussée auquel il faut ajouter l'éclairage dû aux réflexions sur les piédroits. Plus ces derniers sont clairs, plus les réflexions parasites sont importantes et plus la valeur de l'éclairage vertical final est grande. Le paramètre de qualité de contraste se trouve par conséquent réduit, ce qui peut être pénalisant pour une installation à contre flux qui verra ainsi son paramètre de qualité de contraste définitif inférieur à la valeur résultant de la seule prise en compte des caractéristiques des luminaires et de la chaussée.

Le coefficient de clarté de la chaussée est un des paramètres les plus difficiles à estimer justement, car il dépend étroitement de la spécularité de la chaussée, de sa clarté, et du type d'installation d'éclairage (symétrique ou à contre flux). En effet une chaussée très diffusante est insensible au type de l'installation car la lumière est ré-émise dans toutes les directions et peu sensible à la position des sources lumineuses. Il n'en est pas de même pour une chaussée spéculaire qui paraîtra, à éclairage horizontal constant, beaucoup plus claire en contre flux qu'en symétrique, car les rayons lumineux arriveront dans le premier cas avec une incidence plus marquée, et se réfléchiront plus facilement.

En outre, le comportement photométrique d'une chaussée en tunnel peut se révéler très différent de ce qu'il est de jour à l'air libre du fait que la lumière provient de points particuliers : les appareils d'éclairage.

Le coefficient de clarté de la chaussée peut varier, pour une chaussée très sombre, de 0,10 lorsqu'elle est éclairée en symétrique et qu'elle est très diffusante, à 0,25 lorsqu'elle est légèrement spéculaire et éclairée en contre flux. Le coefficient de clarté peut augmenter jusqu'à des valeurs de 0,30 lorsque la chaussée est éclaircie (liant sombre et granulats clairs) ou 0,40 lorsqu'elle est claire (liant clair et granulats clairs).

Il est donc important de connaître les caractéristiques du revêtement final qui sera installé. De plus les caractéristiques à prendre en compte sont celles d'un revêtement utilisé quelques mois et non pas celles existantes à la mise en service. Il sera sans doute intéressant de vérifier l'installation à la mise en service au moyen d'une portion de revêtement connu (surface peinte par exemple) afin de ne pas étudier et de ne caractériser que l'installation électrique en faisant abstraction du revêtement existant.

2.7.3 Objets en limite de visibilité.

Pour qu'un obstacle soit décelable par un automobiliste, il est nécessaire que sa luminance soit suffisamment différente de celle de la chaussée sur laquelle il repose. L'écart de luminance nécessaire $\Delta L(L_{\text{dap}})$ dépend de la luminance d'adaptation de l'automobiliste et est obtenu par les lois gouvernant l'adaptation spatiale.

Les milieux existants entre l'œil du conducteur et l'obstacle (atmosphère et pare brise) absorbent une partie de la lumière et diffusent une fraction de celle-ci. La luminance d'un objet se trouve ainsi modifiée en fonction de la distance d'observation, par rapport à celle mesurée en l'absence de pare brise et de couche d'air d'épaisseur significative (L_{obj}). La luminance apparente d'un objet L'_{obj} est égale à L_{obj} diminuée par les facteurs de transmission des milieux traversés et augmentée par l'effet de la diffusion.

Comme les luminances de l'obstacle et de la chaussée avoisinante subiront le même effet de diffusion, l'écart perçu par le conducteur sera inférieur, à cause de l'absorption, à celui existant à proximité immédiate de l'obstacle. Cet écart doit être égal à l'écart minimum décelable ($\Delta L(L_{\text{adap}})$) calculé par les lois de la visibilité, divisé par les facteurs de transmission du pare-brise et de l'atmosphère.

L'objet paraîtra donc en limite de visibilité, en contraste négatif comme expliqué plus haut, lorsque sa luminance sera égale à celle de la chaussée diminuée du seuil corrigé.

. En utilisant les formules précédentes, il est possible d'exprimer L_{obj} en fonction de L_{ch} par:

$$L_{\text{obj}} = \rho_{\text{obj}} \times \frac{E_v}{\pi},$$

$$\text{Or } E_v = \frac{L_{\text{ch}}}{p},$$

$$\text{soit: } L_{\text{obj}} = \rho_{\text{obj}} \times \frac{L_{\text{ch}}}{p \times \pi}.$$

La limite de visibilité s'exprime par:

$$L_{\text{obj}} = L_{\text{ch}} - \frac{\Delta L(L_{\text{adap}})}{T_{\text{pb}} \times T_{\text{atm}}},$$

en égalant les deux expressions, on obtient alors dans le cas de la limite de visibilité:

$$L_{\text{ch}} \times \left(\frac{\rho_{\text{obj}}}{p \times \pi} - 1 \right) = \frac{-\Delta L(L_{\text{adap}})}{T_{\text{pb}} \times T_{\text{atm}}}$$

$$\text{Soit : } \boxed{L_{\text{ch}} = \frac{\Delta L(L_{\text{adap}})}{T_{\text{pb}} \times T_{\text{atm}} \times \left(1 - \frac{\rho_{\text{obj}}}{p \times \pi} \right)}}$$

La propriété précédente permet d'ajuster la luminance de chaussée à la valeur limite pour que la cible soit en limite de visibilité.

2.7.4 Apport de la lumière extérieure.

Il est possible de prendre en compte l'apport de lumière en provenance de l'extérieur qui modifie notablement les conditions de visibilité dans les premiers mètres du tunnel. Il suffit de superposer aux éclairagements dus à l'installation (E_h , E_v), ceux produits par la lumière extérieure (E_{h_ext} , E_{v_ext}).

La luminance de chaussée devient alors $L_{\text{ch}} = \rho_{\text{ch}} \times \frac{E_h + E_{h_ext}}{\pi}$ et l'éclairement vertical devient

$E_{v_ch} = E_v + E_{v_ext}$. Le terme E_{v_ext} résulte de l'éclairement extérieur direct et de l'éclairement induit par la luminance supplémentaire de la chaussée et des piédroits supposés lambertiens. Donc la luminance de la cible devient:

$$L_{\text{obj}} = \rho_{\text{obj}} \times \frac{E_v + E_{v_ext}}{\pi}.$$

L'installation d'éclairage fournit un éclairement vertical E_v qui sera approximé par la formule L_{cinst}/p

où $L_{\text{cinst}} = L_{\text{ch}} - \frac{\rho_{\text{ch}} \times E_{h_ext}}{\pi} = \frac{\rho_{\text{ch}} \times E_h}{\pi}$ est la part de la luminance de chaussée due à l'installation,

et L_{ch} la luminance totale de la chaussée (tenant compte de l'extérieur). Cette formule est une approximation, car elle sous-entend que la chaussée se comporte comme une surface parfaitement

diffusante indifférente à la localisation des sources lumineuses (le coefficient de clarté utilisé pour la transformation luminance - éclairage horizontal est le même que la lumière provienne de l'extérieur ou des luminaires), alors que dans ce cas l'éclairage supplémentaire provient d'une région particulière de l'espace et que la luminance de la chaussée est sensible à la provenance de la lumière.

L'objet est en limite de visibilité si sa luminance diffère de celle du fond du seuil décelable corrigé pour tenir compte des différents milieux traversés:

$$L_{obj} = L_{ch} - \frac{\Delta L(L_{adap})}{T_{pb} \times T_{atm}} = L_{cinst} + \rho_{ch} \times \frac{E_{h_ext}}{\pi} - \frac{\Delta L(L_{adap})}{T_{pb} \times T_{atm}}$$

or:

$$L_{obj} = \rho_{obj} \times \frac{(E_v + E_{v_ext})}{\pi} = \rho_{obj} \times \frac{\left(\frac{L_{cinst}}{p} + E_{v_ext}\right)}{\pi}$$

Donc:

$$L_{cinst} \times \left(1 - \frac{\rho_{obj}}{p \times \pi}\right) = \rho_{obj} \times \frac{E_{v_ext}}{\pi} + \frac{\Delta L(L_{adap})}{T_{pb} \times T_{atm}} - \rho_{ch} \frac{E_{h_ext}}{\pi}$$

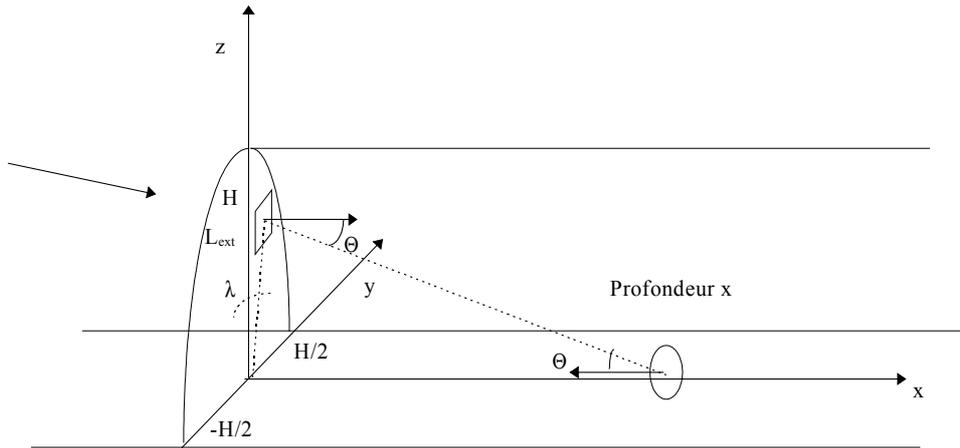
Avec la prise en compte de la lumière extérieure, il apparaît souvent que la cible sera facilement visible en contraste positif dans les premiers mètres du tunnel. Il sera alors inutile de chercher à lutter contre la lumière du jour en installant de forts niveaux d'éclairage. Mais dans ce cas la plage des objets visibles est celle des objets ayant un coefficient de réflexion supérieur à celui de la cible, c'est-à-dire qu'il s'agit des objets plus clairs, alors que la grande majorité des obstacles est plus foncée.

Dans la plupart des cas, quelques mètres plus loin la cible sera rapidement vue en contraste négatif, c'est-à-dire qu'il existera obligatoirement une zone de mauvaise visibilité qu'il est impossible d'éliminer totalement mais que l'installation d'éclairage pourra tenter de minimiser.

L'apport de lumière naturelle permet, dans les 5 ou 10 premiers mètres selon la configuration du tunnel, de voir la cible type en contraste positif. Les niveaux qui seraient nécessaires pour permettre de la voir en contraste négatif sont généralement trop élevés pour être installés. Après cette première zone, l'installation d'éclairage artificiel doit permettre cette vision en contraste négatif. La zone de mauvaise visibilité, qui apparaîtra à la suite de la diminution de l'apport de lumière extérieure, sera d'autant courte que l'installation assurera son rôle rapidement. Il pourrait être envisagé de créer un premier palier court mais fournissant un éclairage conséquent.

Estimation de la modification de l'éclairage vertical:

L'influence de la lumière du jour sur l'éclairage vertical sur une cible posée à différente distance de l'entrée sur la chaussée peut être estimée en considérant l'entrée du tunnel comme une source étendue de luminance donnée L_{ext} . Si on assimile de plus l'entrée à un demi-cercle de rayon H, en utilisant les angles Θ et λ :



Le flux reçu au centre de la cible ΔS (de hauteur faible devant H) est égal à:

$$\Phi = \int_{\theta=0}^{\theta=\theta_{\max}} \int_{\lambda=-\pi/2}^{\lambda=\pi/2} L_{\text{ext}} \times \Delta S \times \sin(\theta) \times \cos(\theta) d\theta d\lambda = \pi \times L_{\text{ext}} \times \Delta S \times \frac{(1 - \cos(\theta_{\max}))}{2}$$

L'éclairement vertical varie donc approximativement au milieu de la chaussée selon la loi:

$$E_v = \frac{\pi}{2} \times L_{\text{ext}} \times \left(1 - \frac{x}{\sqrt{H^2 + x^2}}\right) \approx \frac{\pi}{2} \times L_{\text{ext}} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{H}{x}\right)^2 \quad (\text{si } x \gg H)$$

Il décroît donc avec le carré de la distance.

Estimation de la modification de l'éclairement horizontal:

L'éclairement horizontal peut se calculer d'une manière identique en considérant une surface ΔS horizontale. Le flux reçu par au centre de la cible ΔS (de hauteur faible devant H) est égal à:

$$\Phi = \int_{\theta=0}^{\theta=\theta_{\max}} \int_{\lambda=-\pi/2}^{\lambda=\pi/2} L_{\text{ext}} \times \Delta S \times \sin(\theta) \times \sin(\theta) \cos(\lambda) d\theta d\lambda = 2 \times L_{\text{ext}} \times \Delta S \times \int_0^{\theta_{\max}} \frac{1 - \cos(2 \times \theta)}{2} d\theta$$

$$\Phi = L_{\text{ext}} \times \Delta S \times \left(\theta_{\max} - \frac{\sin(2 \times \theta_{\max})}{2}\right) = L_{\text{ext}} \times \Delta S \times \left(\theta_{\max} - \sin(\theta_{\max}) \cos(\theta_{\max})\right)$$

L'éclairement horizontal varie donc approximativement au milieu de la chaussée selon la loi:

$$E_h = L_{\text{ext}} \times \left(a \tan\left(\frac{H}{x}\right) - \frac{x \times H}{H^2 + x^2}\right) \approx L_{\text{ext}} \times \frac{2}{3} \times \left(\frac{H}{x}\right)^3 \quad (\text{si } x \gg H)$$

Il décroît ainsi avec le cube de la distance à l'entrée. La lumière extérieure influe donc moins sur l'éclairement horizontal de la chaussée que sur l'éclairement vertical.

Ces valeurs sont à relativiser par rapport aux niveaux des éclairements fournis par l'installation. Si l'éclairement vertical final peut être perturbé sur quelques dizaines de mètres après l'entrée du tunnel, l'éclairement horizontal ne le sera que sur quelques mètres.

En pratique, l'estimation de l'apport de la lumière extérieure est difficile à réaliser avec justesse dans

les projets. De plus les résultats des calculs effectués avec et sans lumière extérieure ont montré que les niveaux nécessaires sont, dans la grande majorité des cas, du même ordre de grandeur au bout de quelques de mètres à l'intérieur du tunnel.

Aussi, les projets sont réalisés sans tenir compte de la lumière extérieure. Il est admis que le sur-éclairage dû à la lumière du jour est suffisant dans cette première partie du tunnel. D'autre part l'installation débute à une profondeur dans le tube égale à une longueur du module installé, car dans cette courte zone les niveaux de luminance de chaussée atteints grâce à la lumière naturelle sont suffisants.

2.8 Comparaisons avec les autres méthodes (CIE et CEN) ([3], [4]).

La méthode exposée permet de déterminer en chaque endroit de la chaussée la valeur de luminance de chaussée nécessaire pour qu'un automobiliste soit en mesure de détecter une cible type posée sur la chaussée.

La commission internationale de l'éclairage (CIE) et le comité européen de normalisation (CEN) proposent une méthode commune qui n'est toutefois pas approuvée à ce jour en ce qui concerne la normalisation européenne. Celle-ci est basée sur les travaux de SCHREUDER, DE BOER et d'ADRIAN. Elle comprend deux étapes. En premier lieu, on détermine le niveau de luminance de chaussée nécessaire dans les premiers mètres du tunnel pour déceler un obstacle. Ensuite le niveau de luminance de chaussée en un endroit donné du tunnel est calculé en utilisant une loi de décroissance unique qui permet de connaître le rapport existant entre la valeur à l'entrée et la valeur au point considéré.

Dans cette méthode, l'adaptation spatiale en entrée du tunnel dimensionne l'installation, puis la l'adaptation temporelle conditionne la décroissance de la luminance de chaussée. Cela sous entend qu'au delà de premier palier, les niveaux nécessaires à l'adaptation temporelle assurent l'adaptation spatiale, c'est-à-dire qu'ils permettent la détection d'une cible type. Il s'agit là d'une différence fondamentale avec la méthode proposée qui vérifie qu'en chaque point du tunnel, adaptation spatiale et adaptation temporelle sont vérifiées. Il faut souligner que selon les vitesses d'approche d'un tunnel, le phénomène dimensionnant l'installation est soit l'adaptation spatiale, soit l'adaptation temporelle. A forte vitesse la nécessité de voir loin, donc de résoudre l'adaptation spatiale, impose en entrée des niveaux qui assurent l'adaptation temporelle. Au contraire à faible vitesse, la distance d'arrêt est courte, et le phénomène principal sera l'adaptation temporelle qui imposera le niveau initial. Ces distinctions ne sont pas prises en compte par la méthode CIE.

En outre le niveau de luminance au seuil du tunnel est déterminé, dans cette méthode, en fonction de résultats d'expériences, au cours desquelles des observateurs placés devant un écran de taille importante devaient discerner une cible. Or les conditions rencontrées dans le cas des tunnels sont différentes car elles varient continuellement quand l'automobiliste s'approche de l'entrée sombre du tunnel entourée par le paysage clair et qu'il doit détecter un obstacle tombé au sol. Les conditions d'adaptation dans la pratique sont différentes des conditions expérimentales

2.8.1 Les expériences de SCHREUDER [9] et DE BOER.

Pour cette raison SCHREUDER et DE BOER se sont placés dans des conditions plus proches de la réalité. Ils ont cherché à déterminer le ratio $L2/L1$ nécessaire pour qu'un automobiliste détecte une cible de contraste C placée dans une fenêtre de luminance $L2$, elle-même intégrée dans un environnement de luminance $L1$. Le fond $L1$ est sensé représenter l'environnement du tunnel,

schématisé par la fenêtre L2. La taille de cette fenêtre est du même ordre de grandeur que celle d'un tunnel observé depuis un point situé à une centaine de mètres en amont.

Des observateurs étaient adaptés à un écran de luminance uniforme L1. A un instant donné, apparaissaient pendant un temps bref (0,1 seconde) la fenêtre L2 et la cible de taille angulaire 7' soit 20 cm à 100 m. Les observateurs devaient préciser s'ils avaient pu distinguer la cible.

Les résultats de ces expériences se présentent sous forme de graphiques qui traduisent le ratio L2/L1 nécessaire pour que 75 % des observateurs détectent une cible en fonction de son contraste C et de la luminance L1.

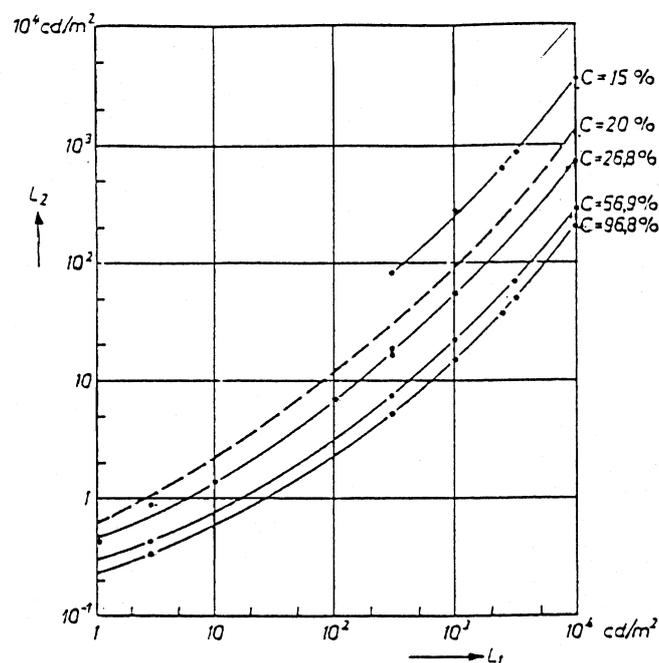


figure 9: Valeur de la luminance L2 nécessaire pour voir un objet de contraste C en fonction de la luminance L1, et utilisant le contraste C comme paramètre.

Le ratio L2/L1 trouvé par le Dr SCHREUDER, pour une cible de contraste 0,2 était de l'ordre de 0,1, mais il faut noter que les conditions ne sont pas exactement celles que l'automobiliste rencontre, car dans cette expérience, le tunnel lui est présenté un laps de temps très court, alors qu'en réalité, il participe largement à l'adaptation.

Lorsque les résultats de cette expérience sont utilisés dans le cas d'un tunnel, il est fait l'hypothèse que l'influence de ce dernier sur l'adaptation du conducteur est négligeable lorsque le conducteur se trouve à une centaine de mètres de l'entrée. En effet le fait de faire apparaître simultanément le tunnel et la cible à détecter revient à utiliser les conditions d'adaptation créées par l'environnement seul.

2.8.2 Les expériences d'ADRIAN [11].

ADRIAN a aussi effectué des expériences allant dans ce sens et a proposé une méthode pour déterminer la valeur de la luminance de chaussée en entrée de tunnel. Il utilise la luminance d'adaptation $L_{adap} = L_{2^\circ} + L_{FRY}$ en tenant compte de la présence du tunnel, afin de déterminer le seuil de luminance décelable $\Delta L(L_{adap})$. Les voiles parasites se réduisent en effet dans le cadre expérimental au voile de Fry, car les observateurs n'utilisent pas de véhicules et sont en laboratoire. Il calcule ensuite la valeur L_{th} de luminance de chaussée nécessaire pour qu'une cible de contraste C soit visible en entrée du tunnel. Pour cela il utilise le fait que le tunnel occupe la majeure partie du cône de vision centrale (2° représente environ 3,5 m à 100 mètres) pour assimiler L_{2° à L_{th} qui est donc la luminance de chaussée en entrée de tunnel. Il en découle que $L_{adap} = L_{th} + L_{FRY}$, et que la cible sera en limite de visibilité si $C \times L_{th} = \Delta L(L_{th} + L_{FRY})$. ADRIAN a ainsi établi grâce à ses lois sur la visibilité une relation entre le voile parasite d'éblouissement (Voile de FRY) et la luminance de chaussée en entrée de tunnel. Il a utilisé une cible de taille angulaire égale à $10'$ soit 30 cm à 100 mètres exposée 0,1 seconde. Les résultats sont repris dans la figure suivante:

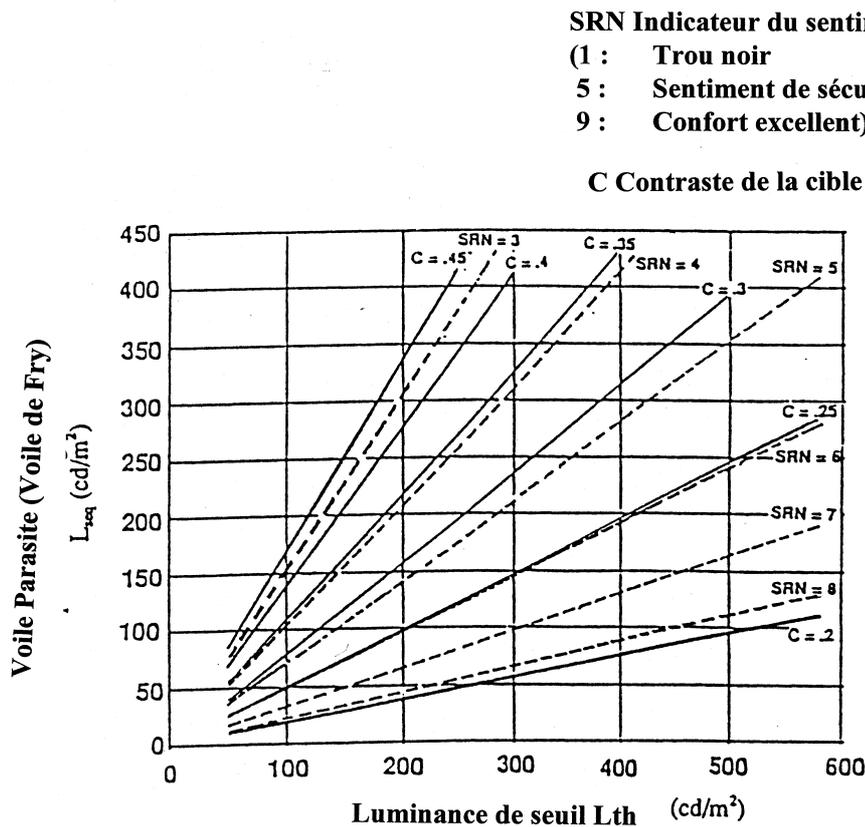


figure 10: Valeur du voile parasite maximal admissible pour voir un objet de contraste C en fonction de la luminance L_{th} , et utilisant le contraste C comme paramètre.

Il apparaît une relation linéaire entre la valeur du voile parasite et la luminance de chaussée nécessaire pour déceler une cible de contraste donné en entrée de tunnel. ADRIAN a établi en outre

une relation entre la luminance de chaussée, le niveau du voile parasite et l'impression visuelle ressentie par des observateurs au moyen d'une échelle comprise entre 1 et 9 notée SRN (pour safety rating number).

1 traduit l'effet de trou noir,

3 indique que les observateurs ont l'impression que le tunnel est trop sombre,

5 qu'ils commencent à se sentir en sécurité,

7 puis 9 traduisent une bonne puis excellente qualité de confort.

La figure montre que les résultats sont en parfait accord avec l'expérience précédente car plus le niveau de confort augmente, plus le contraste minimum perceptible augmente, et inversement.

ADRIAN a ainsi établi une bonne corrélation entre la détection d'une cible en entrée de tunnel, et le sentiment totalement subjectif de sécurité chez des observateurs. La valeur de contraste juste acceptable est d'après le résultat de cette expérience proche de 0,3 (0,29) correspondant à SRN 5 pour une cible de 30 cm à 100m.

Il utilise pour calculer le niveau de luminance de chaussée en entrée de tunnel ses résultats en indiquant soit la valeur du contraste minimum à percevoir, soit le niveau d'impression de sécurité que les utilisateurs du tunnel doivent ressentir. A partir de ces paramètres et de l'estimation du niveau du voile parasite, il en déduit le niveau de luminance de chaussée à installer.

2.8.3 La méthode CIE.

Ces résultats sont à la base de la méthode proposée à la fois par le CEN et par la CIE, qui ont indiqué en plus une loi de décroissance admissible sensée résoudre l'adaptation temporelle lorsque l'automobiliste traverse l'ouvrage. Cette loi de décroissance est basée sur les travaux de SCHREUDER sur la vitesse maximale admissible de décroissance de la luminance d'adaptation mentionnée précédemment dans le paragraphe sur l'adaptation temporelle, ainsi que sur l'hypothèse qu'il a faite sur le début de la prise en compte de l'influence du tunnel. Cette méthode nécessite de connaître la valeur du voile parasite dû à l'éblouissement, valeur jugée difficilement calculable du fait de la complexité des formules et difficilement mesurable car cela demande une lentille spéciale dite de FRY qui reprend les caractéristiques de l'oeil humain. Elle propose donc d'estimer ce voile en mesurant la luminance moyenne dans un cône de 20° d'ouverture devant l'observateur notée L_{20° , et considère que le voile parasite lui est proportionnel.

Cette méthode de dimensionnement est basée sur des expériences faites dans certaines conditions (cible de 10' exposée 0,1 s) dont les résultats ont été extrapolés pour s'adapter à d'autres situations en particulier à d'autres distances d'observation. Ainsi la connaissance de la valeur de L_{20° mesurée à une distance équivalente à la distance d'arrêt retenue pour le projet permet de dimensionner l'ouvrage en utilisant des coefficients de proportionnalité entre la valeur L_{20° et la luminance de chaussée à installer en entrée de tunnel. La luminance de chaussée à différentes profondeurs est obtenue grâce à la loi de décroissance retenue.

Cette méthode est basée sur les résultats d'ADRIAN, tout comme la méthode préconisée par le CETU. Il est donc normal que dans des conditions équivalentes, les résultats soient voisins en particulier dans le cas d'un tunnel schématisé dans l'expérience de base. Mais la méthode CIE a été généralisée afin de pouvoir être employée dans d'autres situations que celle de l'expérience de base. Des écarts apparaissent car la méthode CETU cherche à résoudre séparément les problèmes de l'adaptation spatiale et de l'adaptation temporelle dont l'importance respective varie en fonctions des

tunnels et de la position du conducteur par rapport à l'entrée du tunnel.

2.8.4 Rapport entre le contraste de la cible et son coefficient de réflexion.

La méthode de dimensionnement retenue par le CETU est basée sur la visibilité d'une cible de coefficient de réflexion donné ρ_{obj} , alors que les expériences précédentes sont basées sur la visibilité d'une cible de contraste donné. Le rapport entre les deux est explicité ci-après :

Par définition du contraste, en application de la loi de LAMBERT, et en introduisant le paramètre de qualité de contraste p de l'installation, on a:

$$C_{obj} = \frac{L_{obj} - L_{ch}}{L_{ch}} = \frac{\frac{\rho_{obj} \times L_{ch}}{p \times \pi} - L_{ch}}{L_{ch}} = \frac{\rho_{obj}}{p \times \pi} - 1$$

donc: $C_{obj} = \frac{\rho_{obj}}{p \times \pi} - 1$

Cette formule montre que le contraste d'un obstacle donné ne dépend pas du niveau d'éclairage, mais seulement du type de l'installation. Le même objet produit toujours le même contraste à p donné, mais, à ρ_{obj} donné,

$$\text{(en valeur absolue)} \quad C_{obj}(\text{Contreflux}) > C_{obj}(\text{Symétrique})$$

La formule précédente établit une relation générale entre le coefficient de réflexion de la cible type, le paramètre de qualité de contraste de l'installation et le contraste de la cible. Elle montre qu'un même objet sera vu avec un contraste beaucoup plus important en contre flux qu'en symétrique.

La valeur du coefficient de réflexion limite ρ_{obj} traditionnellement utilisée est de 0,3, ce qui conduit à un contraste négatif de -0,36 en symétrique ($p=0,15$) et à un contraste négatif de -0,9 en contre flux ($p=1$). Ces valeurs montrent l'importance du paramètre de qualité de contraste pour la visibilité, et son influence sur le contraste d'un objet de coefficient de réflexion donné.

La méthode CIE, basée sur les travaux d'ADRIAN, préconise de dimensionner l'entrée des tunnel de manière à assurer qu'une cible de contraste 0,3 avec la chaussée avoisinante et de 40 cm de haut puisse être détectée en 0,1 seconde par un automobiliste arrivant près de l'entrée. Il est alors intéressant de comparer cette valeur, qui ne prend pas en compte le type d'installation, avec les contrastes calculés plus haut.

Pour comparer ces valeurs de contraste relatives à des cibles en limite de visibilité, il est nécessaire d'utiliser des obstacles de même taille, devant être détectés dans un laps de temps identique. La méthode CIE utilise une cible de 40 centimètres, alors que l'objet fréquemment retenu dans la méthode décrite ici a une hauteur de 25 centimètres. Pour corriger cela, on utilise la loi de RICCO ($C \times \varepsilon^2 = \text{Constante}$ où ε est la taille angulaire de la cible, et C son contraste avec le fond) afin d'opérer une correction de taille sur ces valeurs limites. La modification, induite par la durée de détection différente dans les deux méthodes, est estimée au moyen de la formule d'ADRIAN. Cette dernière indique que le seuil de luminance nécessaire à la détection d'une cible en 0,1 seconde sera égal au seuil nécessaire à la détection en 1 seconde multiplié par 2.

Une fois les corrections de taille et de temps de détection effectuées sur les valeurs -0,36 et -0,9, on

obtient comme contraste correspondant pour la cible type les valeurs de -0,28 en symétrique et -0,7 en contre flux. Les contrastes nécessaires pour détecter des obstacles de plus grande taille sont diminués. La valeur de contraste de 0,28 est proche de celle préconisée par la CIE (0,3).

Cela explique que les deux méthodes sont pratiquement équivalentes en éclairage symétrique pour des distances d'observation de l'ordre de 100 m.

Une telle comparaison n'est pas possible en contre flux, car les performances de l'installation ne sont pas utilisées dans les préconisations de la CIE. Il faut noter que la formule établie plus haut montre que, dans le cas du contre flux ($p=1$), les contrastes varient dans une plage dont les limites sont : -0,68 et -1, lorsque les coefficients de réflexion varient de 0 à 1.

L'avantage d'utiliser le coefficient de réflexion limite de la cible type, ainsi que le paramètre de qualité de contraste de l'installation consiste, à prendre effectivement en compte l'efficacité du contre flux, car les caractéristiques de l'installation sont ainsi utilisées, ce qui n'est pas le cas dans la méthode CIE.

3. Les calculs.

Le présent chapitre 3 décrit la façon dont les principes exposés précédemment sont mis en œuvre dans les calculs couramment réalisés au CETU. Les valeurs recommandées dans le dossier pilote des tunnels ont été établies de cette façon.

3.1 Les hypothèses simplificatrices.

Pour mettre en œuvre les différentes lois, il est nécessaire de connaître les voiles parasites susceptibles d'être rencontrés par l'automobiliste à l'approche du tunnel. Ces voiles peuvent être mesurés sur le site et ainsi être connus sous la forme de courbes dépendant de la distance séparant l'automobiliste de la tête du tunnel. Ces courbes sont ensuite utilisées dans les calculs pour déterminer la luminance d'adaptation du conducteur ainsi que les conditions de visibilité rencontrées.

Dans le cas de projets neufs, les caractéristiques photométriques et géométriques de l'architecture finale ne sont pas toujours connues précisément. Il est alors nécessaire de procéder à des simplifications et à des schématisations afin de rendre possibles les calculs. Le site est modélisé de manière à prendre en compte les éléments les plus importants du paysage. Le tunnel est considéré comme rectangulaire creusé dans une paroi verticale ayant une certaine hauteur et infiniment large. Chaque partie du paysage est connue par sa luminance: le ciel, la paroi, la tête du tunnel, et la route extérieure. La tête du tunnel peut avoir une épaisseur et sortir de la paroi. Lorsque le tunnel n'a pas un profil rectangulaire, il faut alors utiliser des dimensions qui prennent en compte grossièrement les caractéristiques de l'ouvrage.

Les calculs utilisent la cible type considérée comme représentative des obstacles potentiels: c'est une cible verticale, plane de 25 cm de haut posée au milieu de la chaussée et de coefficient de réflexion égal à 0,3.

Comme mentionné plus haut, la situation de référence prise en compte concerne un automobiliste âgé de 40 ans qui se présente devant un tunnel en roulant à la vitesse du projet. Il doit être en mesure de détecter la cible type tout au long de la traversée de l'ouvrage suffisamment loin pour s'arrêter en toute sécurité, c'est-à-dire lorsqu'elle se situe à une distance du conducteur égale à la distance d'arrêt du projet. Cette détection doit s'effectuer en moins d'une seconde.

3.2 L'algorithme.

Dans un premier temps, le tunnel est supposé être éclairé selon la méthode proposée par la CIE. Cette solution provisoire permet de prendre en compte approximativement l'influence du tunnel dans l'adaptation du conducteur.

Un automobiliste est supposé s'approcher ensuite de l'ouvrage pas par pas. Les calculs démarrent lorsqu'il se trouve à une distance de l'entrée égale à la distance d'arrêt. Pour chacune de ses positions, sa luminance d'adaptation est calculée en fonction des éléments présents dans son champ de vision.

3.2.1 Vérification de l'adaptation spatiale.

- Le seuil minimal de luminance permettant de déceler la cible type est calculé en utilisant les lois de visibilité d'ADRIAN et la luminance d'adaptation du conducteur calculée précédemment.
- La luminance de chaussée nécessaire à une distance du conducteur égale à la distance d'arrêt est calculée en utilisant les variables du projet, le paramètre de qualité de contraste de l'installation, le coefficient de clarté de la chaussée et le coefficient de réflexion de l'obstacle type.
- La luminance de chaussée provisoire à la même distance est ensuite comparée avec la luminance minimale calculée. Si ces deux valeurs ne sont pas égales, la luminance de chaussée est corrigée sur toute la partie du tunnel postérieure à l'endroit où se trouve la cible (cf §3.5).

3.2.2 Vérification de l'adaptation temporelle.

La luminance d'adaptation du conducteur à un instant donné est dépendante des conditions qu'il a déjà rencontrées. Elle ne doit pas varier trop rapidement, et être compatible avec les limites imposées par les valeurs précédemment atteintes et la loi de décroissance admissible retenue. La limite imposée par chacune des positions antérieures de l'automobiliste est calculée. Chaque lieu de passage de l'automobiliste impose une limite obtenue par une fonction de décroissance admissible tenant compte de la durée écoulée depuis son passage à l'endroit considéré, et du niveau de la luminance d'adaptation que l'automobiliste avait lors de son passage à cette position.

Si le niveau actuel de la luminance d'adaptation est inférieur au maximum des limites précédentes, une correction est effectuée (cf §3.6).

L'adaptation temporelle doit être vérifiée tout au long de la traversée du tunnel. Le défaut d'adaptation peut être ressenti notamment lorsque l'automobiliste franchit le porche. Il est possible qu'il existe une autre zone où, si aucune correction n'est apportée, le défaut d'adaptation temporelle soit sensible, lorsque l'automobiliste se trouve à une profondeur comprise entre une et deux fois la distance d'arrêt, selon sa vitesse.

Quelquefois, les niveaux nécessaires pour assurer la détection de la cible type dans les premiers mètres du tunnel assurent l'adaptation temporelle du conducteur lorsque celui-ci s'approche. Dans ce cas, il n'existe qu'une zone dans laquelle une correction s'avère nécessaire. Exceptionnellement, les niveaux requis pour assurer l'adaptation spatiale sont très élevés et assurent l'adaptation temporelle tout au long de la traversée.

3.3 La solution provisoire.

Initialement le tunnel est supposé être éclairé selon la méthode CIE. C'est-à-dire que la luminance de chaussée est constante et égale à une valeur notée traditionnellement L_{th} sur un premier palier de longueur égale à la moitié de la distance d'arrêt. Après ce premier palier, le niveau de la luminance de chaussée décroît de manière continue selon la loi de décroissance retenue dans la méthode préconisée par la CIE et par le CEN.

La valeur de la luminance de seuil L_{th} est fonction de la luminance moyenne dans un cône de 20 degrés L_{20° calculée à une distance égale à la distance d'arrêt correspondant à la vitesse retenue pour le projet, et d'un coefficient k obtenu en fonction des conditions d'utilisation du tunnel:

$$L_{th} = k \times L_{20^\circ} [4].$$

La décroissance suit la méthode recommandée par la méthode CIE à savoir que la luminance de chaussée est constante sur une distance égale à la moitié de la distance d'arrêt. Ensuite sur une distance équivalente (à la moitié de la distance d'arrêt) la décroissance est linéaire jusqu'à une valeur égale à 40 % du niveau initial L_{th} . Ensuite, la décroissance est conforme à une fonction de décroissance admissible $f(t) = (1,9 + t)^{-1,48}$ où t est la durée que met le conducteur pour arriver à l'endroit considéré (donc fonction de sa vitesse).

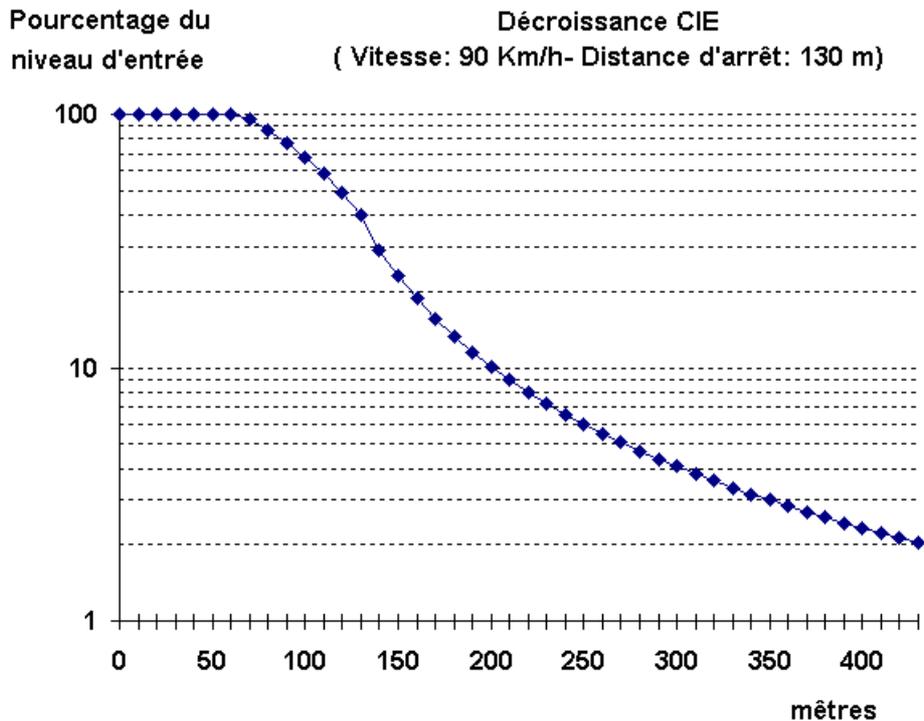


figure 11: Courbe de décroissance de la luminance de chaussée selon la méthode CIE.

3.4 Calcul de la luminance d'adaptation et de L_{20° .

La formule de la luminance d'adaptation est $L_{adap} = T_{atm} \times T_{pb} \times (L_{2^\circ} + L_{Fry}) + T_{pb} \times L_{atm} + L_{pb}$

Cette formule utilise la luminance moyenne dans un cône étroit de 2° d'axe identique à celui du regard à laquelle on rajoute les différents voiles parasites et où les facteurs de transmission des milieux traversés interviennent. Pour calculer la luminance moyenne dans un cône d'ouverture donnée, les éléments du paysage présents dans un cône de sommet coïncidant avec les yeux de l'utilisateur sont déterminés et leur contribution est évaluée. L'étendue géométrique de chacun est calculée, puis multipliée par la valeur de la luminance de cet élément. Ainsi cela fournit la valeur du flux lumineux en provenance de ce dernier.

La prise en compte du tunnel est particulière car la luminance de la chaussée et le facteur de transmission de l'air changent en fonction de la profondeur obligeant à faire un calcul d'intégrale tout au long du tunnel. D'autre part, dans le cas d'un tunnel court, il est possible que le conducteur aperçoive la sortie, qui doit être prise en compte effectivement.

Lorsque toutes les parties visibles du paysage ont été explorées, la somme des différents flux est

faite, puis divisée par l'angle solide du cône afin d'obtenir une luminance moyenne.

Le voile de Fry peut être intégré de plusieurs manières:

- soit grâce à une série de mesures sur site au moyen d'un luminancemètre équipé d'une lentille de Fry, à plusieurs distances de l'entrée du tunnel;
- soit grâce au recalcul du voile en utilisant les formules du § 2.7.1 et une description sommaire du site;
- soit grâce à l'estimation par la luminance moyenne dans un cône symbolisant le champ de vision du conducteur, en utilisant la description sommaire du site.

Ces trois méthodes présentent des avantages et des inconvénients:

la première nécessite des mesures sur le site qui est dans le cas des projets neufs souvent susceptible d'évoluer fortement après les mesures (revêtement définitif de la chaussée non posé, architecture des têtes non finie, végétation provisoire);

la seconde sera d'autant plus précise que la description du site le sera (les éléments définitifs n'étant pas connus, en général, au moment des calculs);

la troisième est une approximation de la méthode précédente et est aussi sensible à la précision de la description du site. De plus, elle ne prend pas en compte les éléments lumineux hors du cône, et tient compte, contrairement à la précédente, des éléments présents au centre du champ de vision (comme le tunnel par exemple).

En règle générale, en l'absence de mesures, le calcul du voile de Fry par la formule sera privilégié. Toutefois si la description du site est trop sommaire ou si les caractéristiques du projet sont mal connues, l'estimation par une luminance moyenne fournira une précision suffisante.

Le coefficient de proportionnalité nécessaire dans la troisième méthode, entre le voile de Fry et la luminance moyenne dans le cône symbolisant le champ de vision du conducteur, est un paramètre du projet qui peut être adapté lorsque des mesures ponctuelles de luminance de Fry ont été faites, permettant ainsi un étalonnage des calculs.

Il faudra rester prudent dans les cas extrêmes où le soleil peut être bas sur l'horizon, et lorsque le ciel occupe une grande partie du champ de vision. Dans ces cas, en effet, les calculs peuvent être erronés car le soleil est une source ponctuelle extrêmement lumineuse dont le calcul actuel ne peut pas tenir compte (et dont il est impossible de contrecarrer l'effet sur la visibilité au seul moyen de l'éclairage), et car la luminance du ciel varie par temps clair de façon considérable en fonction de l'heure et de l'orientation du point regardé.

Selon que les voiles parasites sont connus ou non, la méthode de détermination de la luminance d'adaptation change légèrement. Les voiles seront connus, dans le premier cas, grâce à une interpolation faite entre les points de mesures encadrant la position du conducteur, et dans le second cas grâce à une formule. Les voiles peuvent être déterminés sur le terrain, en mesurant la luminance d'un objet, placé près de l'entrée, à différentes distances (entre 0 et 100 m). Le voile atmosphérique en un point donné est obtenu en comparant la valeur lue à proximité immédiate de l'obstacle avec la lecture faite au point considéré. Le coefficient de transmission de l'air extérieur est toujours pris égal à 1. Le voile de pare brise, ainsi que le coefficient de transmission du pare brise, peuvent être déduits grâce à des comparaisons similaires avec des mesures faites à l'intérieur d'un véhicule, auxquelles la valeur du voile atmosphérique aura été ôtée. Ces estimations ne seront toutefois valables que pour le véhicule utilisé.

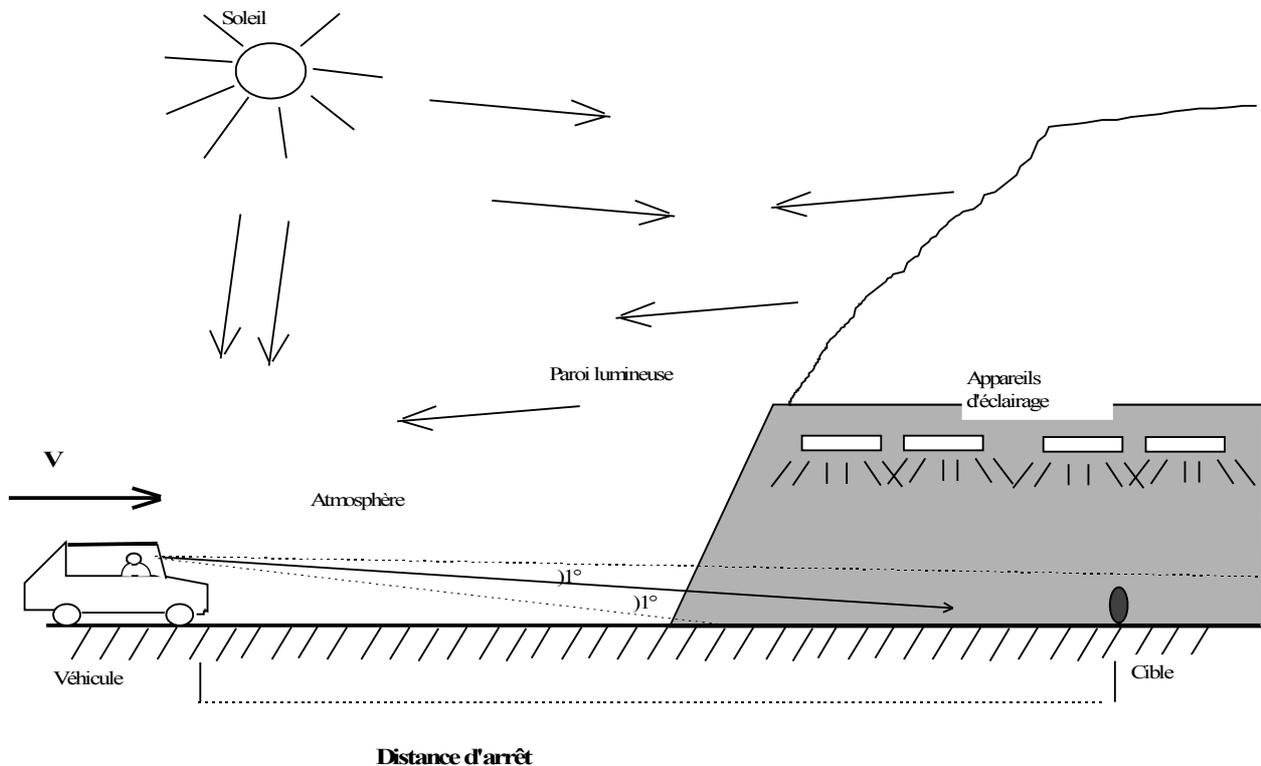


figure 12: schématisation de la situation rencontrée par un automobiliste s'approchant du tunnel.

3.4.1 Longueur visible.

Les tunnels longs n'étant pas rectilignes, les automobilistes ne voient pas l'ensemble du tunnel. Dans ce but, le calcul limite artificiellement la partie utile du tunnel présente devant eux à une distance égale à quatre fois la distance d'arrêt. A la fin de cette partie utile, le conducteur n'aperçoit que les piédroits. Dans le cas où le tunnel est court, le conducteur risque d'apercevoir la sortie, qui sera schématisée grâce aux luminances du ciel, de la route extérieure et de la végétation.

3.4.2 Point d'attention du conducteur.

Il est admis qu'un conducteur regarde un point situé à une distance fonction de sa vitesse. Plus sa vitesse est élevée, plus il regarde loin. La distance du point d'attention est fonction de la distance d'arrêt associée et estimée à environ une fois et demie celle-ci.

Le point d'attention est au centre du cône de 2° degrés, et participe activement au dimensionnement de la luminance d'adaptation. Ce point est situé sur la chaussée, et est entouré d'une zone comprenant la chaussée avoisinante et les piédroits proches. Cette zone occupe une grande partie du cône de vision centrale et est le facteur prépondérant pour la luminance d'adaptation.

D'après ce qui précède, si l'on considère deux automobilistes entrant dans un même tunnel à deux

vitesse différentes, leurs luminances d'adaptation respectives en un endroit donné vont être différentes car ils n'auront pas le même point d'attention. Le regard du conducteur le plus rapide portera plus loin que celui de l'autre automobiliste. La luminance de la chaussée décroissant lorsque l'on s'enfonce dans le tunnel, les points regardés par les automobilistes n'auront pas la même luminosité lorsque ceux-ci seront au même endroit. Le point le plus éloigné aura une luminance inférieure au point le plus proche. Comme les voiles parasites seront identiques puisque les automobilistes sont au même endroit, il en résulte une différence d'adaptation. La luminance d'adaptation du conducteur le plus rapide sera inférieure à celle du conducteur le plus lent, car ce dernier regardera un point plus proche de l'entrée qui sera plus éclairé donc plus lumineux.

Si le tunnel a été dimensionné pour une vitesse donnée, les conducteurs arrivant à cette vitesse ne seront pas gênés par un défaut d'adaptation temporelle, car l'installation aura été étudiée en conséquence. Par contre un automobiliste arrivant plus lentement risquerait d'être gêné car les conditions qu'il rencontre sont différentes, et l'adaptation temporelle risque de ne plus être assurée.

Les calculs faits en utilisant un point d'attention situé à une distance fonction de la vitesse ont montré que les faibles vitesses étaient pénalisées par cet effet.

Pour éviter ce problème sensible et pénalisant à faible vitesse, la distance du point d'attention utilisée pour le calcul de la luminance d'adaptation ne descend jamais en dessous de 70 mètres. Le conducteur est supposé regarder à une distance minimale devant lui.

En conséquence, on considère que le conducteur regarde un point situé sur la chaussée et éloigné de lui d'une distance égale à une fois et demie la distance d'arrêt, et au minimum de 70 mètres.

3.5 Correction due à l'adaptation spatiale.

La valeur de luminance de chaussée calculée nécessaire à un endroit donné est comparée avec la luminance provisoire et si une correction s'avère nécessaire, celle-ci est faite à partir de l'endroit où se trouve la cible, jusqu'à la fin du tunnel. Toutefois, la correction ne peut avoir pour effet de conduire à des valeurs inférieures à celle retenue pour la section courante.

Les valeurs de la luminance de chaussée sont multipliées uniformément par un facteur égal au rapport entre le niveau existant au point sur lequel le calcul a porté et le niveau nécessaire calculé.

Cette correction permet d'affiner la solution provisoire, pour les positions ultérieures de l'automobiliste. Ces corrections doivent être suffisamment faibles pour ne pas trop influencer sur le niveau de la luminance d'adaptation du conducteur. Il faudrait sinon réaliser une itération après chaque modification afin de vérifier que la correction est compatible avec la nouvelle luminance d'adaptation. Cela augmenterait très sensiblement le temps de calcul. Les vérifications effectuées a posteriori ont toutefois montré que les valeurs de luminance de chaussée ainsi obtenues laissent la cible type en limite de visibilité. Cela prouve que l'influence des corrections sur la luminance d'adaptation est très faible, et qu'elles ne modifient pas fondamentalement les conditions rencontrées par l'automobiliste.

3.6 L'adaptation temporelle.

Les variations brutales de la luminance d'adaptation peuvent gêner les conducteurs en provoquant des baisses de la visibilité. Le système d'éclairage doit permettre d'assurer la visibilité en atténuant

ces changements et en les rendant acceptables pour les automobilistes.

La luminance d'adaptation doit donc être supérieure à une limite dépendant des conditions rencontrées par l'automobiliste avant d'arriver au point du calcul.

Une correction sera nécessaire lorsque le niveau obtenu à l'issue des étapes précédentes est insuffisant. La luminance de la chaussée présente dans le cône de vision utilisé pour le calcul sera augmentée suffisamment pour que le niveau de la luminance d'adaptation suive approximativement la décroissance autorisée.

La correction apportée sur la luminance de chaussée à un endroit donné est calculée à partir du rapport entre la luminance nécessaire et la luminance actuelle et est proportionnelle à l'influence de cette partie de chaussée dans le calcul de la luminance d'adaptation. La luminance des piédroits est supposée proportionnelle à celle de la chaussée. Toute modification de la luminance de chaussée entraînera une modification de celle des piédroits et par conséquent la luminance d'adaptation sera modifiée de manière proportionnelle à l'influence de cette partie du tunnel. Cette méthode permet d'optimiser les corrections en privilégiant les parties du tunnel qui ont le plus d'influence. En effet l'influence d'une modification du niveau de luminance de chaussée en un endroit précis sur la luminance d'adaptation du conducteur dépendra de la distance entre ce dernier et le point du calcul. Les modifications les plus importantes seront faites aux endroits qui ont une influence prédominante dans le calcul de la luminance d'adaptation.

Lorsqu'une correction a été faite afin de résoudre le problème posé par l'adaptation temporelle, la luminance d'adaptation devient approximativement égale à la limite imposée par la courbe de décroissance maximale. Le niveau de la luminance de chaussée a été augmenté aux endroits visibles par le conducteur. Il y aura ainsi de fortes chances que, lorsque le conducteur aura avancé dans le tunnel, l'adaptation spatiale soit résolue. La luminance de chaussée se trouvera être supérieure au niveau nécessaire, mais aucune réduction ne pourra être faite à l'endroit où se trouve théoriquement la cible sous peine d'anéantir la correction précédemment effectuée. Dans ces conditions, les corrections d'adaptation spatiale ne seront faites que dans les zones qui n'étaient pas visibles lorsque le conducteur était à la position où a eu lieu la correction d'adaptation temporelle (dans la pratique la partie visible est limitée car le tunnel est supposé en effet non rectiligne).

3.6.1 Modèle de correction.

La contribution de la partie visible du tunnel dans le calcul de la luminance d'adaptation peut être estimée au moyen d'une somme de l'influence de chacune des "tranches de tunnel" visibles.

Une tranche i située à une distance x aura une influence ΔL_i proportionnelle à la luminance de la chaussée L_{chi} à cet endroit : $\Delta L_i = L_{chi} \times c_i$, du fait que la luminance de chacun des éléments la constituant (chaussée, piédroits et plafond) est proportionnelle à la luminance de la chaussée. Une modification de la luminance de chaussée L_{chi} en $L_{chi} + \Delta L_{chi}$ se répercutera donc au niveau de la luminance d'adaptation par $d(\Delta L_i) = \Delta L_{chi} \times c_i$

Si un conducteur est suffisamment proche de l'entrée, à une distance inférieure à 40 mètres, le cône de vision centrale sera totalement inclus dans le tunnel, et donc sa luminance d'adaptation pourra être calculée par la formule :

$$L_{adap} = \sum \Delta L_i + T_{pb} \times L_{atm} + L_{pb} + L_{fry}$$

$$L_{adap} = \sum L_{chi} \times c_i + T_{pb} \times L_{atm} + L_{pb} + L_{fry} = \sum L_{chi} \times c_i + L_{voiles}$$

Les corrections dues à l'adaptation temporelle seront faites en comparant L_{adap} avec L_{db} la valeur limite obtenue pour assurer l'adaptation temporelle. Si $L_{\text{adap}} < L_{\text{db}}$, alors $\Delta L = L_{\text{db}} - L_{\text{adap}}$ représente la différence à combler.

La correction apportée à la luminance de chaussée de la $i^{\text{ème}}$ tranche sera quasiment proportionnelle à l'influence de cette tranche, donc proportionnelle à c_i . Elle sera telle que: $\Delta L_{\text{chi}} = \lambda \times c_i^\alpha \times \Delta L$ où λ est le coefficient de proportionnalité et α un exposant.

Cette modification influe sur la luminance d'adaptation par $d(\Delta L_i) = \Delta L_{\text{chi}} \times c_i$ et doit vérifier

$$\Delta L = \sum d(\Delta L_i) = \sum c_i \times \Delta L_{\text{chi}} = \sum \lambda \times c_i^{(1+\alpha)} \times \Delta L.$$

Donc $\lambda = \frac{1}{\sum c_i^{(1+\alpha)}}$ la correction apportée à la luminance de la chaussée de la $i^{\text{ème}}$ tranche est donc

$\Delta L_{\text{chi}} = \Delta L * \frac{c_i^\alpha}{\sum c_i^{(1+\alpha)}}$. Les coefficients c_i ne dépendent que de la distance séparant l'automobiliste de l'endroit de la correction et peuvent être calculés une seule fois.

Le paramètre α a été introduit pour permettre une modulation des corrections. Selon que α est supérieur ou inférieur à 1, les zones plus ou moins proches du conducteur seront ou non privilégiées. Le coefficient c_i , relatif au $i^{\text{ème}}$ tronçon de tunnels, est en effet inférieur à 1 et décroît lorsque la distance entre la tranche de tunnel et le conducteur augmente. Le fait de l'élever à la puissance α permet d'augmenter ou non l'influence de la partie de tunnel concernée selon que cet exposant est supérieur ou inférieur à 1. Cette modulation est particulièrement utile lorsque le phénomène dimensionnant les niveaux d'éclairage est l'adaptation temporelle, car elle permet de répartir vers l'intérieur du tunnel le défaut de la luminance d'adaptation, et diminue ainsi le niveau initial.

3.6.2 Voiles parasites.

Avec la méthode précédente, le défaut de luminance d'adaptation a été intégralement répercuté sur la partie visible du tunnel. Or les voiles parasites vont être modifiés à la suite des corrections et la luminance d'adaptation finale risque d'être supérieure à la valeur strictement suffisante pour assurer l'adaptation temporelle. Si l'on suppose qu'ils vont augmenter dans les mêmes proportions que la luminance moyenne dans le cône de vision centrale, le seuil ΔL doit en tenir compte de la manière suivante:

La luminance d'adaptation est la somme de deux termes $L_{\text{adap}} = L_t + L_{\text{voiles}}$: l'un (L_t) traduisant l'influence du tunnel et l'autre (L_{voiles}) celle des voiles parasites. Après correction, L_t devient $L_t' = L_t + \Delta L$ et L_{voiles} devient $L_{\text{voiles}}' = L_{\text{voiles}} + \Delta L_{\text{voiles}}$. Du fait que les voiles augmentent dans les mêmes proportions que L_t , $\Delta L_{\text{voiles}} = \frac{L_{\text{voiles}}}{L_t} \times \Delta L$.

On doit obtenir : $L_{\text{db}} = L_{\text{adap}} + \Delta L + \Delta L_{\text{voiles}} = L_{\text{adap}} + \left(\frac{L_{\text{voiles}}}{L_t} + 1\right) \times \Delta L = L_{\text{adap}} + \frac{L_{\text{adap}}}{L_t} \times \Delta L$

soit $\Delta L = \frac{(L_{\text{db}} - L_{\text{adap}})}{L_{\text{adap}}} \times L_t = \frac{(L_{\text{db}} - L_{\text{adap}})}{L_{\text{adap}}} \times (L_{\text{adap}} - L_{\text{voiles}})$

La prise en compte des voiles parasites permet ainsi de diminuer légèrement l'écart de luminance à combler.

3.6.3 Limitations des corrections.

Les corrections de luminance de chaussée peuvent conduire à des niveaux très importants sur des courtes distances. Il a été décidé d'offrir la possibilité à l'utilisateur du programme de limiter la valeur maximum de la luminance de chaussée. Cette possibilité conduira à effectuer des compensations qui majoreront les luminances dans d'autres zones sans toutefois dépasser la valeur maximale spécifiée. Cette limite ne peut toutefois être inférieure à la luminance nécessaire pour résoudre l'adaptation spatiale.

Une telle limitation pourrait limiter les niveaux à une valeur inférieure à la valeur nécessaire pour que l'adaptation temporelle soit réalisée. Pour tenir compte de cette contrainte, et dans le cas où la valeur que l'on s'est autorisée, devrait d'après les calculs être dépassée à un endroit donné, la correction faite sur la chaussée située au delà sera majorée en conséquence.

Si ΔL est l'écart de luminance à combler, la correction normale dans la i ème section est: $\Delta L_{chi} = \lambda \times c_i^\alpha \times \Delta L$ donc la luminance de chaussée finale est $L_{chi} + \Delta L_{chi}$. Si cette valeur dépasse L_{max} la valeur maximale autorisée, la correction n'aura été que de $\Delta L_{chi} = L_{max} - L_{chi}$. L'influence sur la luminance d'adaptation se traduit par $\Delta L_i' = c_i \times (L_{max} - L_{chi})$ au lieu de $\Delta L_i = \lambda \times c_i^{(1+\alpha)} \times \Delta L$.

La différence entre les deux doit être compensée sur les sections de chaussée suivantes. Les corrections ultérieures se feront en utilisant un nouvel écart de luminance d'adaptation $\Delta L'$ calculé de la façon suivante:

$$\text{L'écart final sera } \Delta L = c_i \times (L_{max} - L_{chi}) + \sum_{j \neq i} \lambda \times c_j^\alpha \times \Delta L' \text{ et donc } \Delta L' = \frac{\Delta L - c_i \times (L_{max} - L_{chi})}{\lambda \times \sum_{j \neq i} c_j^{1+\alpha}}.$$

$$\text{Or } \lambda = \frac{1}{\sum c_i^{1+\alpha}} \text{ donc } \lambda \times \sum_{j \neq i} c_j^{1+\alpha} = \lambda \times (\sum c_j^{1+\alpha} - c_i^{1+\alpha}) = 1 - \lambda \times c_i^{1+\alpha}$$

$$\Delta L' = \frac{\Delta L - c_i \times (L_{max} - L_{chi})}{1 - \lambda \times c_i^{1+\alpha}} = \frac{\Delta L - c_i \times (L_{max} - L_{chi})}{1 - \lambda \times c_i^{1+\alpha}} = \Delta L + \frac{c_i \times (L_{chi} + \lambda \times c_i^\alpha \times \Delta L - L_{max})}{1 - \lambda \times c_i^{1+\alpha}}$$

La correction pourra être réalisée dans les sections de tunnels suivant le lieu où la luminance de chaussée est maximale en remplaçant l'écart constaté initial ΔL par la valeur $\Delta L'$ précédente. Ainsi l'adaptation temporelle sera vérifiée tout en limitant les valeurs de la luminance de chaussée.

3.7 Calcul de l'apport extérieur.

L'éclairage horizontal supplémentaire de la chaussée et l'éclairage vertical sur les cibles sont calculés pour les premiers mètres du tunnel en utilisant une luminance moyenne de l'environnement venant de derrière le conducteur qui est introduite comme un paramètre du projet. Si cette valeur est nulle, la lumière extérieure n'est pas prise en compte. Si cette valeur est forte, le ciel dans le demi-espace derrière l'automobiliste est très lumineux. Le rectangle constitué par l'entrée du tunnel est considéré comme ayant cette luminance. Les calculs sont faits en déterminant l'étendue

géométrique de l'entrée vue depuis le sol, et en la multipliant par la valeur introduite.

L'éclairage horizontal supplémentaire est sensible dans les 20 à 30 premiers mètres, alors que l'éclairage vertical peut être augmenté jusqu'à une profondeur de 100 m.

L'annexe 1 explicite les relations entre luminances de l'environnement et de la chaussée extérieure, d'une part, et éclairages horizontal et vertical dûs à la lumière du jour au seuil du tunnel, d'autre part.

3.8 *Prise en compte du profil en long.*

La méthode décrite dans les paragraphes précédents, permet de calculer les niveaux de luminance de chaussée nécessaires en tunnel, en considérant celui-ci horizontal. Cependant cette méthode peut être généralisée à des tunnels présentant un point haut ou un point bas en limitant le calcul de la luminance d'adaptation aux seules parties visibles. Pour cela celles-ci sont déterminées avec précision en tenant compte de la position du changement de pente, et nécessitent le calcul des longueurs visibles de chaussée et de plafond, ainsi que les hauteurs visibles de pénétrations.

4. Exemple de calculs.

Ce chapitre contient des exemples de calculs de niveaux de luminance de chaussée nécessaires en entrée de tunnel, et détaille certains paramètres utilisés.

4.1 Voiles extérieurs utilisés.

Lorsque la géométrie d'un site d'un tunnel n'est pas connue avec précision, on utilise pour estimer le voile de Fry la méthode la plus simple qui consiste à considérer ce voile comme proportionnel à la luminance moyenne du champ de vision du conducteur. Dans le cas où les renseignements sur l'architecture finale de la tête sont très succincts, ce voile est obtenu au moyen d'une formule de la forme : $V_{Fry} = K_1 \times d$ où d est la distance séparant l'automobiliste de l'entrée du tunnel. $K_1=1,5$, 3 ou 4 pour les voiles faibles, moyens ou forts, et le voile est constant pour une distance de la tête supérieure à 100 mètres et égal à la valeur atteinte à cette distance.

Le voile atmosphérique dû à l'air extérieur est obtenu au moyen d'une formule de la forme :

$V_{atm} = K_2 \times d$ où d est la distance séparant l'automobiliste de l'entrée du tunnel. $K_2 = 1,2$ ou 3 pour les voiles faibles, moyens ou forts.

De même, le voile de pare brise est obtenu au moyen d'une formule: si la distance d entre l'automobiliste et le porche est inférieure à 50 mètres, $V_{pb} = K_3 \times d$; $K_3 = 1,2$ ou 4 pour les voiles faibles, moyens ou forts, et le voile est constant après cette distance et égal à la valeur atteinte à 50 mètres.

4.1.1 Voiles résultants.

La figure suivante indique la variation du voile résultant de la somme des voiles précédents compte tenu de l'absorption due au pare brise dans trois situations correspondant à trois niveaux de luminosité de l'environnement (fort-moyen-faible).

L'air extérieur est considéré comme pur, c'est à dire qu'il n'absorbe pas la lumière. Le voile résultant est la somme du voile atmosphérique, du voile de Fry et du voile de pare brise. Le voile de Fry et le voile atmosphérique sont diminués par l'absorption du pare brise, son facteur de transmission est pris égal à 0,85.

Le voile de Fry et la luminance moyenne dans le champ de vision du conducteur utilisent les luminances des éléments du paysage. Lorsque ceux ci sont à l'intérieur du tunnel, leur luminance apparente se trouve réduite du fait de l'absorption par l'air intérieur au tunnel.

Le voile atmosphérique est constitué lui même de deux parties correspondant à l'air extérieur au tunnel et à l'air intérieur. Le voile atmosphérique extérieur est obtenu au moyen d'une formule, alors que le voile atmosphérique intérieur est calculé au moyen d'une formule intégrale (cf § 2.7.1).

En résumé on a: $L_{voiles} = L_{pb} + T_{pb} \times (L_{Fry} + L_{atm})$.

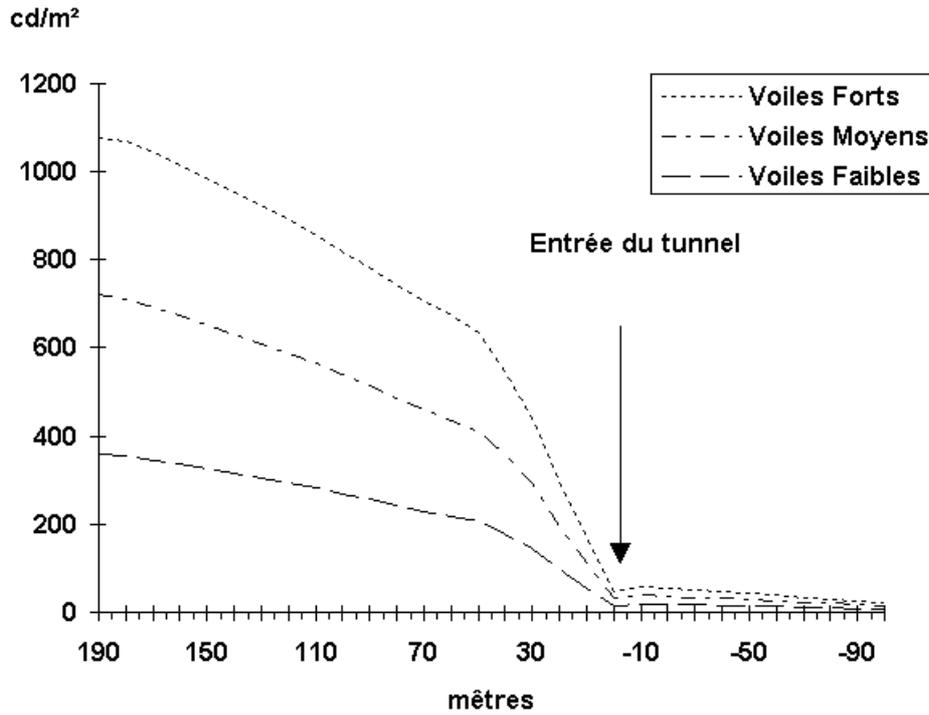


figure 13: Voiles parasites résultants.

Le tableau suivant indique les valeurs fréquemment rencontrées des voiles extérieurs à 100 mètres de l'entrée:

Niveau des voiles	Fort	Moyen	Faible
Voile atmosphérique (cd/m^2)	300	200	100
Voile de pare brise (cd/m^2)	200	100	50
Voile de Fry (cd/m^2)	400	300	150
(L_{moyen} correspondant) (cd/m^2)	(5400)	(4000)	(2000)

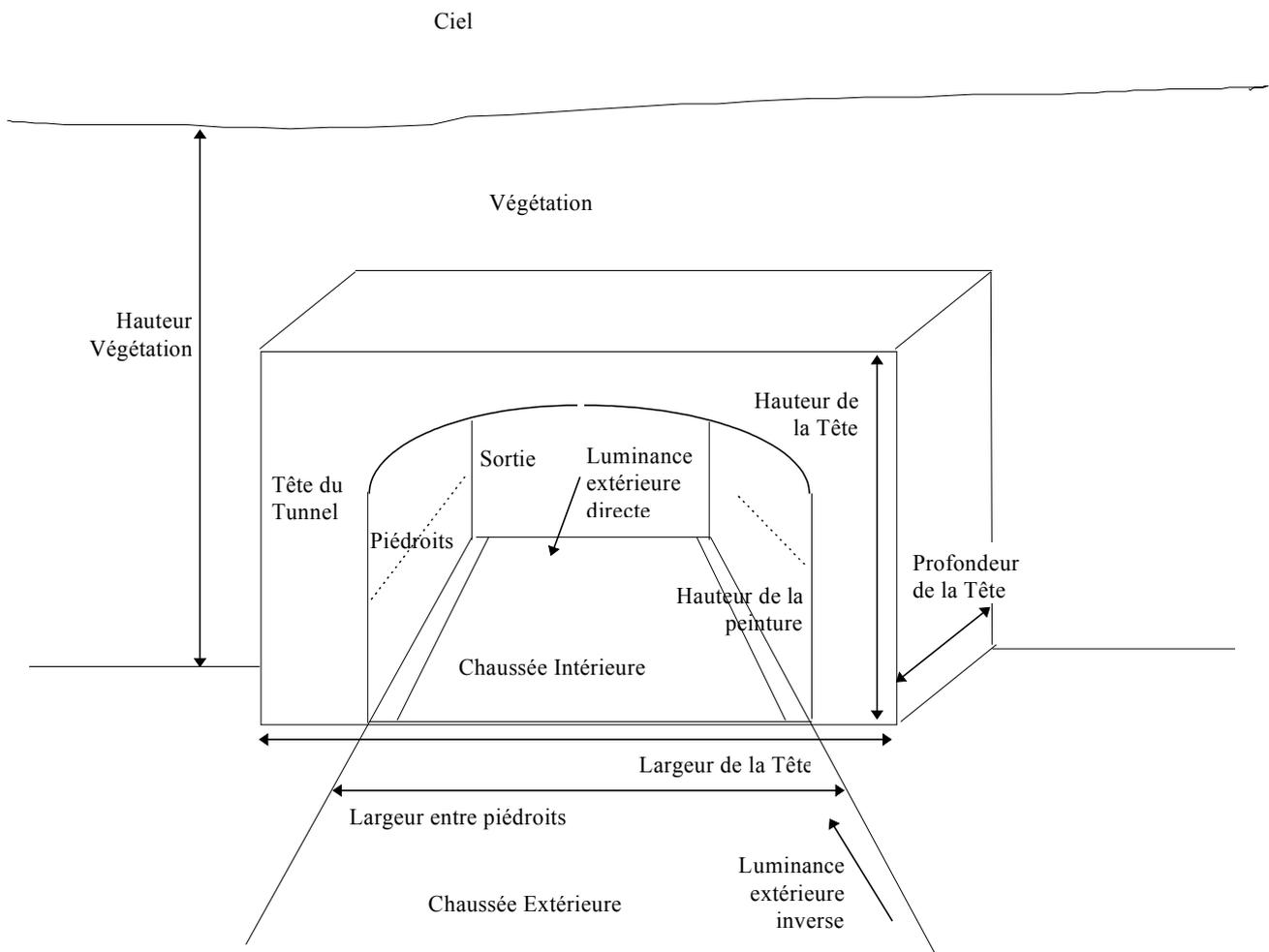


figure 14: Illustration des éléments nécessaires aux calculs.

4.2 Exemple de tunnel.

Les courbes jointes en annexe permettent de visualiser les résultats obtenus par la méthode décrite.

Les caractéristiques constantes sont les suivantes:

Caractéristiques géométriques:

On considère un tunnel rectangulaire de 2000 mètres de long, de 10,5 m de large entre piédroits (chaussée à 2 voies, bande d'arrêt d'urgence et 2 trottoirs) traversant une paroi de 20 m de haut. La tête de l'ouvrage est constituée d'un rectangle de 20 m de large et de 7,5 m de haut. Les yeux de l'utilisateur sont à 1,3 m de hauteur par rapport au sol.

Caractéristiques photométriques:

La chaussée a un coefficient de réflexion de 0,18, les piédroits sont relativement clairs avec un coefficient de réflexion de 0,3. Ces derniers sont peints jusqu'au plafond.

Les caractéristiques photométriques de l'environnement dépendent du type de voiles retenus et sont les suivantes dans le cas de voiles forts:

luminance du ciel : 7500 cd/m²,
luminance de la végétation : 4000 cd/m²,
luminance de la route extérieure : 3000 cd/m²,
luminance de la tête : 3500 cd/m²,

Le coefficient d'extinction K de l'air intérieur est fixé à 0,0025 m⁻¹, l'air extérieur est considéré comme pur. Le facteur de transmission de l'atmosphère d'une couche d'air intérieur au tunnel d'épaisseur x est obtenu par la formule : $T_{atm} = e^{-Kx}$.

T_{pb} le facteur de transmission du pare brise est égal à 0,85. Le paramètre caractéristique de diffusion Ω des particules de fumée est égal à 20.

Les voiles atmosphérique et de pare brise sont estimés au moyen de formules: le voile atmosphérique est proportionnel à la distance de l'entrée ($V_{atm}=3 \times D$). Le voile de pare brise est proportionnel à la distance de l'entrée, jusqu'à une valeur maximale à 50 m ($V_{pb}=4 \times D$).

Le voile de Fry est considéré comme proportionnel à la luminance moyenne dans le champ de vision du conducteur. Le coefficient de proportionnalité choisi est 0,074: $L_{Fry} = 0,074 \times L_{moy}$.

Ces valeurs permettent d'avoir un niveau de voiles parasites à 100 m de la tête de l'ordre de 800 cd/m².

Les valeurs prises pour les voiles moyens et faibles sont égales à celles utilisées avec les voiles forts diminuées respectivement d'un tiers et de deux tiers.

Caractéristiques de l'installation:

Le rapport entre l'éclairement vertical des piédroits et l'éclairement horizontal de la chaussée est 0,4.

Le paramètre de qualité de contraste est considéré comme constant tout au long du tunnel, et est égal à 0,15 dans le cas symétrique et à 1 pour une installation à contre flux.

4.2.1 Résultats avec apport de lumière extérieure.

Les calculs sont faits en tenant compte de la lumière du jour. La luminance du ciel dans le sens inverse au sens de circulation a pour valeur 2000 cd/m². Elle correspond à un éclairement horizontal de 13400 Lux.

Les valeurs du niveau du premier palier à retenir sont déterminées dès que l'influence de la lumière du jour diminue et que la cible ne peut plus être vue en contraste positif. Ceci a lieu après une zone de mauvaise visibilité lorsque la cible passe d'un contraste positif à un contraste négatif. Cette situation est souvent localisée à une profondeur de 20 à 30 mètres à l'intérieur du tunnel où l'éclairement vertical extérieur devient trop faible et permet de percevoir la cible type en contraste négatif.

Les niveaux indiqués sont ceux qui doivent être fournis par l'installation d'éclairage, c'est-à-dire que la luminance supplémentaire due à l'apport de lumière extérieure a été retirée.

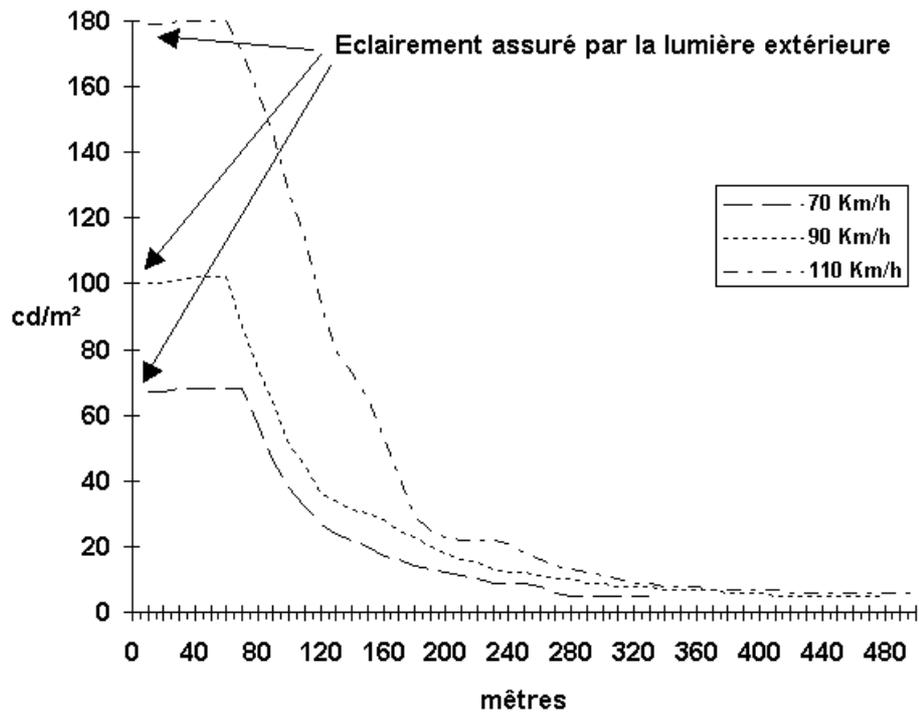


figure 15: Exemple de calculs en Contre Flux.

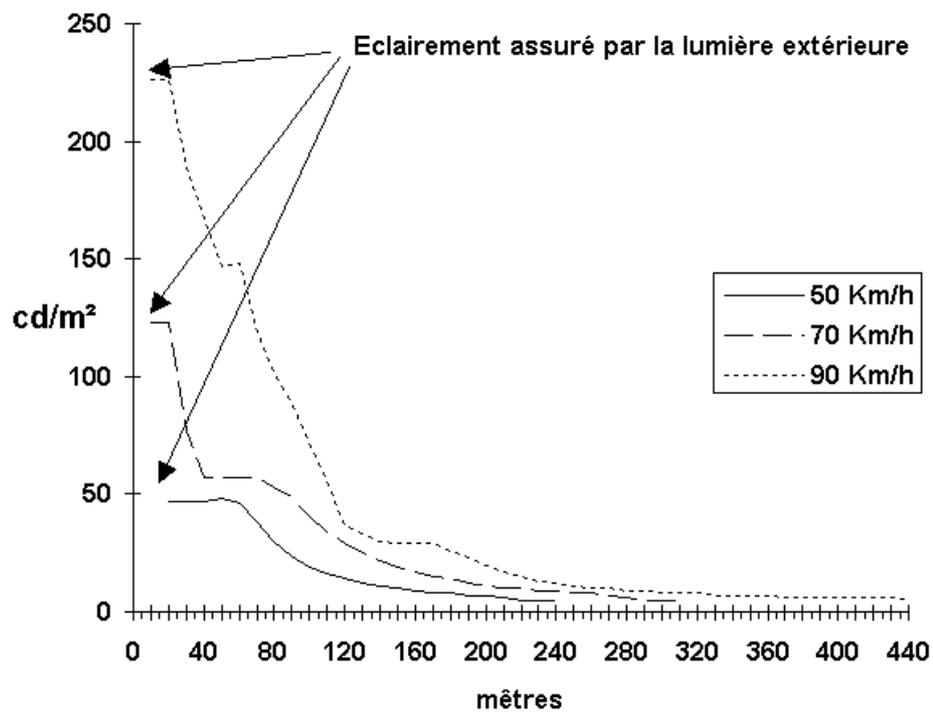


figure 16: Exemple de calculs en Symétrique.

4.2.2 Résultats sans apport de lumière extérieure.

Ces calculs ont été réalisés sans lumière extérieure en utilisant les mêmes caractéristiques que précédemment. Les principales modifications ont lieu en entrée de tunnel.

Les niveaux initiaux sont plus forts lorsque l'adaptation temporelle est le facteur prépondérant car la luminance de la chaussée en entrée de tunnel ne bénéficie pas de l'éclairage supplémentaire de la lumière extérieure. La luminance d'adaptation du conducteur qui s'approche du tunnel est alors inférieure et les corrections dues à l'adaptation temporelle sont plus importantes.

Au contraire, les niveaux sont inférieurs lorsque l'adaptation spatiale est le phénomène le plus important, car l'éclairage vertical arrivant sur la cible théorique est inférieur. Les besoins en éclairage sont donc moindres, car il n'existe pas dans ce cas de zone de mauvaise visibilité.

L'estimation de l'apport extérieur étant en pratique difficile à faire notamment au stade du projet, les résultats utilisés en pratique sont ceux obtenus sans lumière extérieure. Le premier palier installé doit fournir le niveau de luminance de chaussée calculé au droit de l'entrée. Toutefois, les premiers appareils seront installés à quelques mètres à l'intérieur du tube, pour tenir compte de la lumière extérieure.

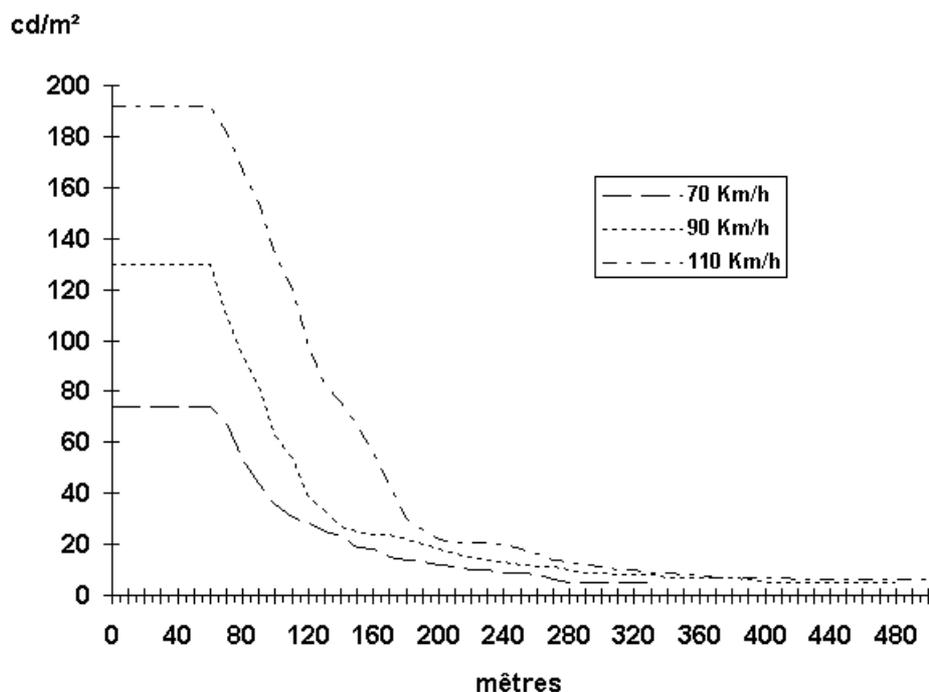


figure 17: Exemple de calculs en Contre Flux.

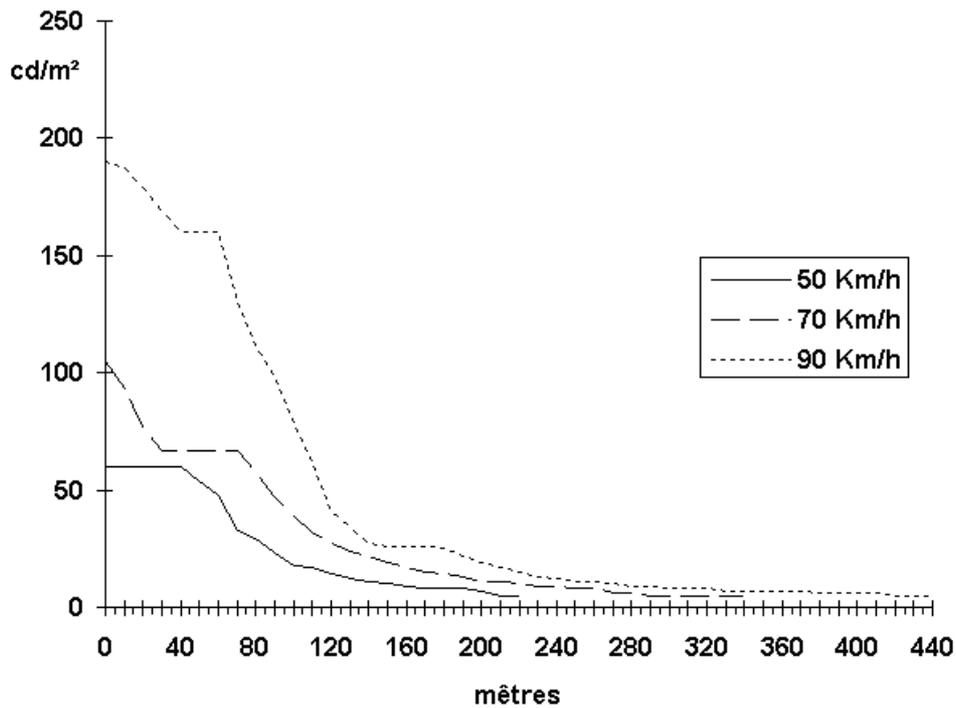


figure 18: Exemple de calculs en Symétrique.

4.3 Résultats généraux.

Des simulations ont été réalisées pour estimer les niveaux de luminance de chaussée nécessaires en entrée de tunnel, dans plusieurs cas de figure susceptibles d'être rencontrés.

Les tableaux suivants résument les valeurs obtenues pour plusieurs vitesses et plusieurs types de voiles parasites pour des installations à contre flux et pour des installations symétriques. Ils sont obtenus sans tenir compte de l'apport de lumière extérieure.

En colonne 1 est indiqué le type de voiles retenu pour le calcul.

En colonnes 2 et 3 sont indiquées la vitesse du projet et la distance d'arrêt associée.

En colonne 4 on trouve le niveau initial nécessaire pour assurer l'adaptation spatiale dans les premiers mètres du tunnel.

En colonne 5 est inscrit le niveau nécessaire pour que l'adaptation temporelle soit aussi vérifiée. Cette colonne contient donc le niveau à installer à l'entrée du tunnel pour que le conducteur puisse s'approcher sans danger.

En colonnes 6,7 et 8 sont notées les longueurs des renforcements nécessaires pour diminuer la luminance de chaussée jusqu'à des valeurs de 8, 5 et 2 cd/m².

Table 1

Contre Flux p=1.							
1	2	3	4	5	6	7	8
	Vitesse (km/h)	Distance d'arrêt (m)	Calculs		Longueur Totale de renforcement		
			Sans Temp. (cd/m ²)	Avec Temp. (cd/m ²)	8 cd/m ² (m)	5 cd/m ² (m)	2 cd/m ² (m)
Voiles Forts	130	275	360	360	520	580	700 (*)
	110	190	176	223	380	430	630
	90	130	97	133	310	370	530
	70	85	53	83	250	300	370
Voiles Moyens	130	275	251	251	480	530	670 (*)
	110	190	124	149	330	380	580
	90	130	69	86	270	330	530
	70	85	37	61	220	270	360
Voiles Faibles	130	275	122	122	430	470	600 (*)
	110	190	61	74	250	290	470
	90	130	34	44	200	250	430
	70	85	19	32	160	190	350

(*) Les niveaux calculés pour résoudre l'adaptation spatiale assurent l'adaptation temporelle dans l'ensemble du tunnel.

Table 2

Symétrique p=0.15

1	2	3	4	5	6	7	8
	Vitesse	Distance	Calculs	Calculs	Longueur Totale de renforcement		
		d'arrêt	Sans Temp.	Avec Temp.	8 cd/m ²	5 cd/m ²	2 cd/m ²
	(km/h)	(m)	(cd/m ²)	(cd/m ²)	(m)	(m)	(m)
Voiles Forts	110	190	454	454	390	440	580 (*)
	90	130	242	242	310	360	530
	70	85	131	131	250	300	380
	50	50	63	73	170	210	290
Voiles Moyens	110	190	319	319	360	400	490 (*)
	90	130	171	171	280	320	510
	70	85	93	93	220	270	360
	50	50	45	50	150	180	280
Voiles Faibles	110	190	156	156	290	320	400 (*)
	90	130	85	85	200	240	420
	70	85	47	47	160	190	350
	50	50	23	26	100	130	270

(*) Les niveaux calculés pour résoudre l'adaptation spatiale assurent l'adaptation temporelle dans l'ensemble du tunnel.

4.4 Etude de la distance de visibilité.

La distance de visibilité prise en compte dans le calcul est traditionnellement égale à la distance d'arrêt sur route mouillée correspondant à la vitesse retenue pour le trajet. Cela permet d'assurer qu'un automobiliste arrivant à cette vitesse, et circulant seul sur la route pourra s'arrêter après avoir détecté un obstacle tombé au sol. Dans les faits, l'éclairage maximum est nécessaire lorsque le temps est ensoleillé. La distance d'arrêt est très inférieure par temps sec à celle utilisée par temps pluvieux, même si la chaussée en entrée de tunnel est susceptible d'être humide et grasse. D'autre part, en journée, la présence d'autres véhicules est hautement probable. Les véhicules précédant une voiture fournissent des renseignements au conducteur. Hormis le cas où la voiture qui précède le véhicule perd quelque chose, l'obstacle à terre sera détecté par les autres conducteurs et l'allumage des feux arrière signalera le danger. Si l'obstacle tombe de la voiture qui précède, la distance entre les véhicules sera sans aucun doute inférieure à la distance d'arrêt et il ne pourra pas être question de s'arrêter avant.

Il est donc possible d'envisager de diminuer la distance utilisée qui représente le facteur pénalisant dans le dimensionnement. Ceci est corroboré par le fait que les accidents sont extrêmement rares en tête de tunnel, dont certains sont pourtant mal éclairés.

Le tableau suivant indique les résultats obtenus en considérant une distance de visibilité égale à la moitié de la distance d'arrêt pour les vitesses importantes et supérieure à 50 mètres pour les vitesses faibles.

Voiles	Vitesse km/h	Distance de Visibilité (m)	Niveau Symétrique (cd/m²)	Niveau Contre Flux (cd/m²)
Faibles	50	50	23	
	70	50	29	33
	90	65	50	48
	110	95	63	60
	130	137.5		77
Moyens	50	50	48	
	70	50	58	63
	90	65	103	99
	110	95	128	124
	130	137.5		160
Forts	50	50	70	
	70	50	83	83
	90	65	155	150
	110	95	194	188
	130	137.5		238

Une conclusion s'impose : les niveaux sont identiques en symétrique et en contre flux. Cela s'explique par le fait que dans les deux types d'installation, le phénomène physique prépondérant est l'adaptation temporelle. L'adaptation spatiale est beaucoup plus facilement résolue que dans le cas classique, notamment dans le cas symétrique. Les niveaux obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus pour le Contre Flux en utilisant la distance d'arrêt comme distance de visibilité.

Les longueurs des zones de renforcement sont les suivantes :

	Vitesse (km/h)	Distance de Visibilité (m)	Niveaux Calculés (cd/m ²)	Longueur Totale de renforcement		
				8 cd/m ² (m)	5 cd/m ² (m)	2 cd/m ² (m)
Voiles Forts	130	137.5	240	420	480	710
	110	95	180	350	410	640
	90	65	150	300	360	530
	70	50	90	240	290	360
	50	50	75	170	200	230
Voiles Moyens	130	137.5	160	360	420	640
	110	95	120	310	360	520
	90	65	100	260	320	520
	70	50	60	210	260	350
	50	50	50	140	170	210
Voiles Faibles	130	137.5	80	260	310	510
	110	95	60	220	280	440
	90	65	50	180	240	430
	70	50	30	150	190	350
	50	50	25	100	120	200

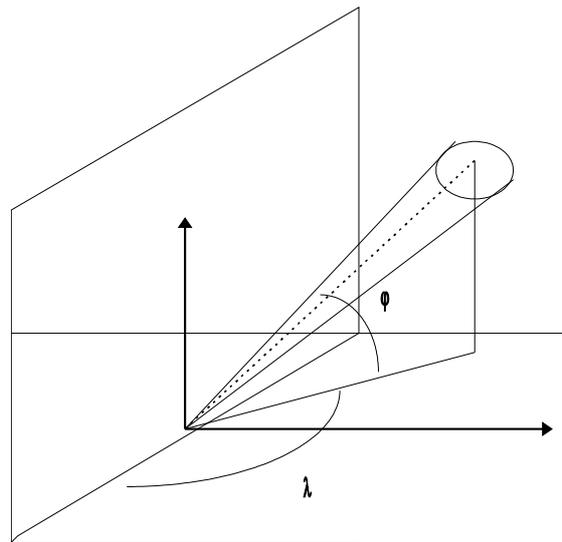
5. Annexe 1.

La méthode de détermination des niveaux de luminance de chaussée en entrée de tunnel, présentée dans ce document, permet de prendre en compte les effets de la lumière extérieure, d'une part, et de la chaussée extérieure, d'autre part. L'influence de la lumière extérieure est estimée au moyen de la luminance moyenne de l'environnement présent derrière le conducteur. Cette dernière n'est pas mesurable directement, mais elle peut être estimée au moyen de l'éclairement vertical ou de l'éclairement horizontal au seuil du tunnel.

5.1 Luminance moyenne de l'environnement et éclairement horizontal au seuil du tunnel.

L'apport extérieur peut être estimé en considérant que l'espace existant derrière le conducteur est de luminance donnée et constante L . Cette luminance est liée à l'éclairement horizontal naturel à l'entrée du tunnel, en supposant la chaussée éclairée par un demi-espace de luminance constante soit :

en utilisant des coordonnées λ et φ pour repérer l'espace:



$$E_h = \int \int L \times \sin(\varphi) d\Omega = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} \int_{\lambda=0}^{\lambda=\pi} L \cos(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi d\lambda$$

$$E_h = L \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} \int_{\lambda=0}^{\lambda=\pi} \frac{\sin(2 \times \varphi)}{2} d\varphi d\lambda = \pi \times L \times \left[\frac{-\cos(2 \times \varphi)}{4} \right]_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} = \pi / 2 \times L$$

donc: $E_h = \pi / 2 \times L$.

5.2 Estimation de l'éclairement vertical au droit de l'entrée:

L'éclairement vertical en entrée de tunnel a deux origines: d'une part l'espace situé derrière le conducteur et d'autre part la chaussée extérieure.

5.2.1 Luminance moyenne de l'environnement et éclairage vertical.

L'apport extérieur peut être estimé en considérant l'éclairage vertical arrivant sur une cible placée à l'entrée du tunnel. En utilisant les mêmes notations que précédemment:

$$E_{V_1} = \int \int L \times \sin(\lambda) \cos(\varphi) d\Omega = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} \int_{\lambda=0}^{\lambda=\pi} L \cos^2(\varphi) \sin(\lambda) d\varphi d\lambda$$

$$E_{V_1} = L \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} \int_{\lambda=0}^{\lambda=\pi} \frac{\cos(2 \times \varphi) + 1}{2} \sin(\lambda) d\varphi d\lambda = 2 \times L \times \left[\frac{\sin(2 \times \varphi)}{4} + \frac{\varphi}{2} \right]_{\varphi=0}^{\varphi=\pi/2} = \pi / 2 \times L$$

L'espace situé derrière l'automobiliste fournit un éclairage vertical égal à l'éclairage horizontal. Toutefois dans la réalité, la chaussée apporte un éclairage vertical supplémentaire qui peut être estimé grâce à la luminance de la chaussée extérieure L_{ch_ext} .

5.2.2 Luminance moyenne de la chaussée extérieure et éclairage vertical.

La chaussée est assimilée à un plan horizontal infini de luminance donnée. En utilisant un repère tel que l'axe des x soit l'axe de la route dirigé vers le tunnel, l'axe des y la perpendiculaire horizontale et l'axe de z, la verticale, l'éclairage vertical dû à la chaussée extérieure est égal à:

$$E_{V_2} = \int_{x=-\infty}^{x=0} \int_{y=-\infty}^{y=+\infty} \frac{L_{ch_ext} \times \cos(u) \times \cos(v)}{r^2} dx dy$$

avec:

- u angle entre la normale à la surface ΔS et la direction de la surface élémentaire $dx dy$;
- v angle entre la normale à la surface $dx dy$ et la direction de la surface ΔS ;
- r distance entre les deux surfaces élémentaires.

Dans ce repère, la cible est située à une hauteur z_0 du sol, et ses coordonnées sont $(0,0,z_0)$. L'intégrale devient:

$$E_{V_2} = L_{ch_ext} \times z_0 \times \int_{x=-\infty}^{x=0} \int_{y=-\infty}^{y=+\infty} \frac{x}{r^4} dx dy = \frac{L_{ch_ext} \times z_0}{2} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{y^2 + z_0^2} = L_{ch_ext} \times \frac{\pi}{2}$$

L'éclairage vertical final au droit de l'entrée du tunnel est donc : $E_{V_1} = \frac{\pi}{2} \times (L + L_{ch_ext})$

Les valeurs des éclairages horizontal et vertical sont à mesurer à l'ombre, pour éviter de perturber les mesures par la pénétration directe de la lumière du soleil.

6. Annexe 2: Les réflexions parasites.

Les calculs des niveaux de luminance de chaussée nécessaire sont effectués en utilisant le paramètre de qualité de contraste de l'installation. Ce paramètre p est égal au rapport entre la luminance de chaussée et l'éclairement vertical à un endroit donné. Or les piédroits peuvent influencer la valeur de ce paramètre car, lorsqu'ils sont clairs, une partie non négligeable de la lumière arrivant sur eux sera ré-émise en direction de la chaussée. Les éclairagements horizontal et vertical peuvent se trouver profondément modifiés.

6.1 Modification de l'éclairement vertical due aux réflexions parasites.

L'éclairement vertical sera ainsi augmenté, et par conséquent le paramètre de qualité de contraste diminuera. Pour tenir compte de ce phénomène, il est possible d'estimer la quantité de lumière supplémentaire renvoyée par les piédroits, et de corriger ainsi la valeur de ce paramètre.

Pour estimer cette quantité, nous pouvons simplifier en supposant le tunnel infini et les piédroits de luminance constante. Ainsi la quantité de lumière Φ , émise par le piédroit, arrivant sur une surface verticale ΔS , perpendiculaire à l'axe du tunnel sera:

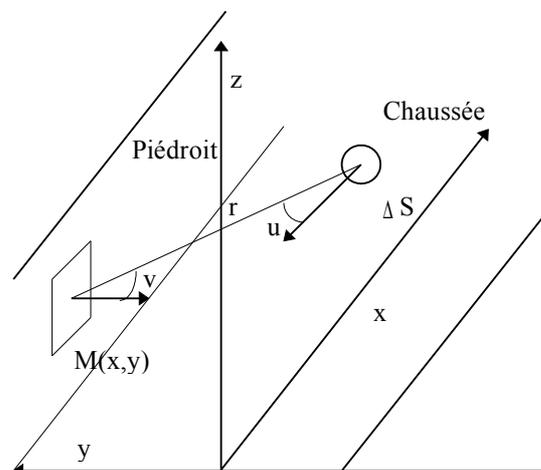
$$\Phi = \int_{x=-\infty}^{x=0} \int_{z=0}^{z=h} \frac{Lpd \times \Delta S \times \cos(u) \times \cos(v)}{r^2} dx dz$$

avec :

- u angle entre la normale à la surface ΔS et la direction de la surface élémentaire $dx dy$;
- v angle entre la normale à la surface $dx dy$ et la direction de la surface ΔS ;
- r distance entre les deux surfaces ;
- Lpd luminance du piédroit.

L'intégrale précédente peut être calculée lorsque la surface ΔS est placée au centre de la chaussée, à une hauteur z_0 proche de 0 et petite par rapport à la largeur L de la chaussée et à la hauteur h du piédroit. Elle devient:

$$\Phi = Lpd \times \Delta S \times \frac{L}{2} \times \int_{x=-\infty}^{x=0} \int_{z=0}^{z=h} -\frac{x}{r^4} dx dz$$



Comme $r^2 = \left(x^2 + \frac{L^2}{4} + (z - z_0)^2 \right)$, en intégrant par rapport à x on obtient:

$$\Phi = Lpd \times \Delta S \times \frac{L}{4} \times \int_{z=0}^{z=h} \frac{dz}{L^2/4 + (z - z_0)^2} = \frac{Lpd \times \Delta S}{2} \times \int_{z=-z_0}^{z=h-z_0} \frac{2 \times dz/L}{1 + 4 \times z^2/L^2} = \frac{Lpd \times \Delta S}{2} \times \left[\arctan\left(\frac{2 \times z}{L}\right) \right]_{-z_0}^{h-z_0}$$

Elle est égale à :

$$\Phi = \frac{Lpd \times \Delta S}{2} \times \left(\arctan\left(\frac{h - z_0}{L/2}\right) + \arctan\left(\frac{z_0}{L/2}\right) \right) \approx \frac{Lpd \times \Delta S}{2} \times \arctan\left(\frac{h}{L/2}\right)$$

Ce flux est doublé grâce à la présence d'un deuxième piédroit : $\Phi = Lpd \times \Delta S \times \arctan\left(\frac{h}{L/2}\right)$.

L'éclairement supplémentaire est donc : $\Delta E_v = \frac{\Phi}{\Delta S} = Lpd \times \arctan\left(\frac{h}{L/2}\right)$.

Le paramètre de qualité de contraste est donc modifié de la façon suivante:

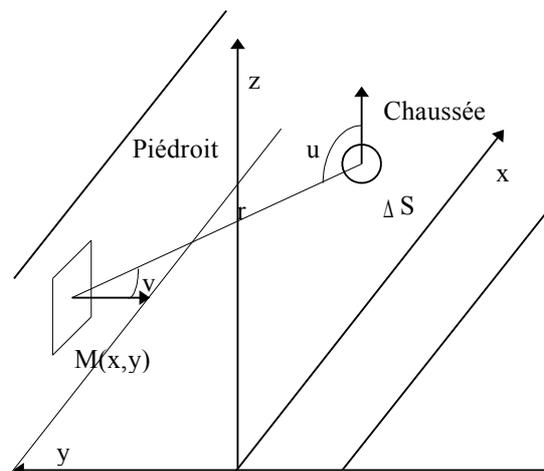
En notant p la valeur finale du paramètre de qualité de contraste, p_0 sa valeur initiale et Lch la luminance de chaussée ;

$$\frac{1}{p} = \frac{E_v + \Delta E_v}{Lch} = \frac{1}{p_0} + \frac{Lpd \times \arctan\left(\frac{h}{L/2}\right)}{Lch}$$

Cette formule permet de prendre en compte la modification du paramètre de qualité de contraste due aux piédroits.

6.2 Influence des piédroits sur l'éclairement horizontal.

Un calcul similaire peut être fait pour estimer l'importance des piédroits sur l'éclairement horizontal au milieu de la chaussée.



Le flux est calculé de la même façon que précédemment, l'angle u étant toutefois différent et la

surface ΔS est placée au niveau de la chaussée ($z=0$), et au milieu de celle-ci:

$$\Phi = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \int_{z=0}^{z=h} \frac{Lpd \times \Delta S \times \cos(u) \times \cos(v)}{r^2} dx dz = \frac{Lpd \times \Delta S}{2} \times \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \int_{z=0}^{z=h} \frac{z \times L}{r^4} dx dz$$

$$\Phi = Lpd \times \Delta S \times L / 2 \times \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \int_{z=0}^{z=h} \frac{z}{(x^2 + L^2 / 4 + z^2)^2} dx dz = -Lpd \times \Delta S \times L / 2 \times \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{x^2 + L^2 + h^2} - \frac{1}{x^2 + L^2} \right] dx.$$

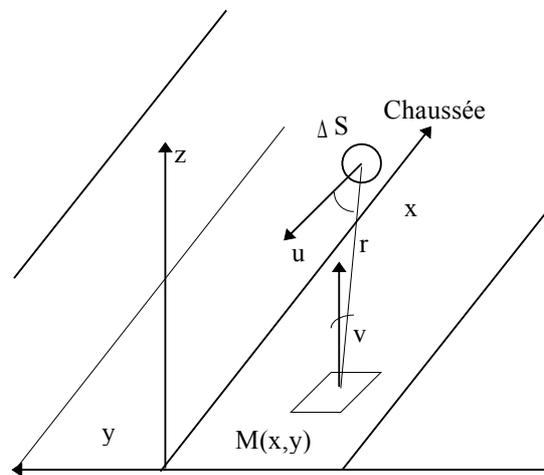
La valeur de l'intégrale est : $\Phi = \pi \times \frac{Lpd \times \Delta S}{2} \times \left(1 - \frac{L}{\sqrt{(L^2 + h^2)}} \right)$. Cette intégrale doit être multipliée par 2 pour tenir compte des deux piédroits et de leur influence identique, car la surface étudiée est au centre de la chaussée.

L'éclairement horizontal supplémentaire est donc :

$$\Delta E_h = \frac{\Phi}{\Delta S} = \pi \times Lpd \times \left(1 - \frac{L}{\sqrt{(L^2 + h^2)}} \right)$$

6.3 Influence de la chaussée intérieure sur l'éclairement vertical.

L'influence de la clarté de la chaussée sur l'éclairement vertical peut être estimée en considérant que la cible verticale est éclairée par un plan horizontal infini de luminance uniforme L_{ch} .



Le flux reçu est donc:

$$\Phi = \int_{x=-\infty}^{x=0} \int_{y=-L/2}^{y=L/2} \frac{Lch \times \Delta S \times \cos(u) \times \cos(v)}{r^2} dx dy$$

$$\Phi = Lch \times \Delta S \times z_0 \times \int_{x=-\infty}^{x=0} \int_{y=-L/2}^{y=L/2} \frac{x}{r^4} dx dy = \frac{Lch \times \Delta S \times z_0}{2} \times \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dy}{y^2 + z_0^2} = Lch \times \Delta S \times a \tan\left(\frac{L}{2 \times z_0}\right)$$

Cette intégrale est égale à (en considérant la largeur de chaussée très supérieure à la dimension de la cible):

$$\Phi = L_{ch} \times \Delta S \times \frac{\pi}{2}$$

L'éclairement vertical sera modifié de ΔE_v :

$$\Delta E_v = L_{ch} \times \frac{\pi}{2}$$

La luminance de chaussée à utiliser est celle de la chaussée vue depuis la cible. Il s'agit de la luminance dans une direction inverse par rapport à celle perçue par le conducteur. Dans le cas d'une installation symétrique, cette luminance de chaussée inverse est à peu près égale à la luminance de chaussée couramment utilisée, c'est-à-dire à celle de la chaussée vue par le conducteur (si l'on ne tient pas compte de l'influence de l'angle d'observation). Par contre dans le cas du contre flux, du fait de l'inclinaison des sources et de la spécularité de la chaussée, cette luminance est très différente de celle perçue par l'automobiliste: elle est inférieure à la luminance de la chaussée utilisée.

6.4 Changement de revêtements.

Si un projet est réalisé en utilisant une chaussée de coefficient de clarté ρ_{ch2} au lieu d'une chaussée de coefficient de clarté ρ_{ch1} , le paramètre de qualité de contraste sera modifié. Comme la formule utilise la luminance de chaussée perçue dans le sens inverse à au sens de circulation, on supposera que cette luminance de chaussée inverse variera dans les mêmes proportions que la luminance dans le sens direct.

L'éclairement vertical supplémentaire est obtenu en comparant les éclairagements verticaux fournis par les deux revêtements. Les luminances des revêtements sont notés L_{ch1} et L_{ch2} dans le sens direct (vu par le conducteur) et L_{ch1_inv} et L_{ch2_inv} dans le sens inverse.

$$\Delta E_v = (L_{ch2_inv} - L_{ch1_inv}) \times \frac{\pi}{2}$$

Le paramètre de qualité de contraste de l'installation sera modifié en conséquence:

$$\frac{1}{p} = \frac{E_v + \Delta E_v}{L_{ch2}} = \frac{1}{p_0} \times \frac{L_{ch1}}{L_{ch2}} + \frac{(L_{ch2_inv} - L_{ch1_inv})}{L_{ch2}} \times \frac{\pi}{2}$$

Cette formule introduit un nouveau paramètre qui est le rapport (noté k) entre les luminances de chaussée dans le sens inverse (donc en direction de la cible) et dans le sens direct (en direction de l'automobiliste). Ce paramètre est connu dans le cas du symétrique et est égal à 1. Dans le cas d'une installation à contre flux il est inférieur à l'unité. On peut écrire, en utilisant la définition du coefficient de clarté:

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{p_0} \times \frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}} + \frac{\pi}{2} \times k \times \left(1 - \frac{L_{ch1}}{L_{ch2}}\right) = \frac{1}{p_0} \times \frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}} + \frac{\pi}{2} \times k \times \left(1 - \frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}}\right) = \frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}} \times \left(\frac{1}{p_0} - k \times \frac{\pi}{2}\right) + k \times \frac{\pi}{2}$$

La figure suivante montre l'évolution du paramètre de qualité de contraste en fonction de ces

différents facteurs.

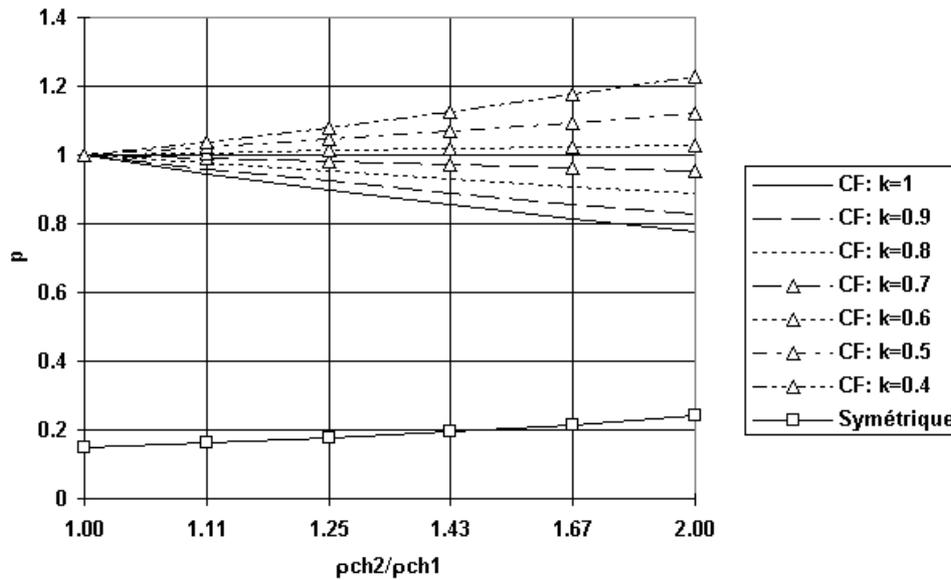


figure 19: Modification du paramètre de qualité de contraste en fonction de l'éclaircissement de la chaussée et du rapport entre les flux lumineux émis par la chaussée vers la cible et vers le conducteur.

Dans le cas d'une installation symétrique ($p_0 = 0,15$ et $k=1$) la valeur du paramètre de qualité de contraste augmentera avec la clarté de la chaussée.

Cette figure montre que le paramètre de qualité de contraste d'une installation à contre flux est susceptible d'augmenter lorsqu'il existe une forte dissymétrie entre les flux lumineux projetés vers l'avant et vers l'arrière.

6.5 Conclusions.

6.5.1 Eclaircissement de la chaussée.

La formule du paragraphe précédent montre que le paramètre de qualité de contraste p d'une installation est une fonction croissante de la clarté de la chaussée (c'est à dire de ρ_{ch2}/ρ_{ch1}) dès que la condition $k < \frac{2}{\pi \times p_0}$ est remplie, (où p_0 est la valeur de ce paramètre obtenu pour une chaussée de coefficient de clarté ρ_{ch1}).

Dans le cas des installations classiques d'éclairage en tunnel, les valeurs du paramètre k sont toujours inférieures ou égales à 1. En effet les installations symétriques renvoient des quantités égales de lumière vers l'avant et vers l'arrière (donc par symétrie $k=1$), et les systèmes à contre flux privilégient la direction de l'automobiliste ($k < 1$). Ainsi, les installations dont le paramètre de qualité de contraste vérifie: $1 < \frac{2}{\pi \times p_0}$, respecteront toujours la condition d'augmentation de ce dernier,

c'est à dire lorsque p_0 est inférieur à 0,64. Dans ces conditions, une augmentation de la clarté de la chaussée améliore la valeur du paramètre de qualité de contraste final.

En particulier pour un éclairage symétrique, le paramètre de qualité de contraste augmente avec la clarté de la chaussée, lorsque le flux lumineux de l'installation est inchangé ($k=1$).

En revanche, pour un éclairage à contre flux, le paramètre de qualité de contraste n'augmente avec la clarté de la chaussée que s'il existe une dissymétrie suffisante entre les flux lumineux renvoyés par la chaussée vers l'avant et vers l'arrière ($k=0,64$ pour $p_0=1$). Dans le cas d'une chaussée parfaitement diffusante ($k=1$ ou classée R0 selon la terminologie CIE), le paramètre de qualité de contraste diminue lorsque la chaussée est éclaircie.

Toutefois, il ne faut en rester à ce simple constat, car l'éclaircissement de la chaussée va améliorer les conditions de visibilité en augmentant la différence de luminance existant entre la cible et la chaussée.

En effet la luminance de l'objet est modifiée, car l'éclairement vertical varie selon la loi établie au

$$\text{§6.4: } \Delta L_{\text{obj}} = \rho_{\text{obj}} \times \frac{\Delta E_v}{\pi} = \rho_{\text{obj}} \times \frac{\Delta L_{\text{ch}}}{\pi} \times \frac{\pi}{2} = 0,15 \times \Delta L_{\text{ch}} \text{ (en prenant } \rho_{\text{obj}}=0,3 \text{)}.$$

Cela conduit à: $\Delta (L_{\text{obj}} - L_{\text{ch}}) = -0,85 \times \Delta L_{\text{ch}}$. Il faut vérifier que cette variation est compatible avec celle de l'écart minimum décelable entraîné par le changement des conditions lumineuses.

Lorsque le conducteur est suffisamment proche de l'entrée, le tunnel occupe la majeure partie de son champ de vision, et sa chaussée remplit le cône de vision centrale. Une modification de la luminance de chaussée ΔL_{ch} entraîne une variation de la luminance d'adaptation du conducteur d'une valeur pratiquement égale.

Or dans la gamme des luminances rencontrées en tunnel (inférieures à 1000 cd/m²), la variation de la luminance d'adaptation se traduit par une variation du seuil minimal décelable très inférieure ($d\Delta L(L_{\text{adap}}) \approx dL_{\text{adap}} / 10$). Cela signifie que la variation de la luminance de la cible sera supérieure à la variation de l'écart minimal perceptible, et par conséquent la détection de la cible se trouvera facilitée.

En conséquence le remplacement d'une chaussée par une chaussée plus claire améliorera la visibilité. La diminution possible de la valeur du paramètre de qualité de contraste, donc de l'efficacité de l'installation, est compensée par une augmentation du contraste entre la cible et la chaussée, donc des conditions de visibilité.

6.5.2 Diminution de l'éclairement horizontal.

L'éclaircissement de la chaussée peut être envisagé afin de tenter de diminuer les niveaux d'éclaircissements artificiels fournis par l'installation dans le but de restreindre la consommation électrique. On étudie la solution consistant à remplacer une chaussée de coefficient de clarté donné, de luminance L_{ch} , par une chaussée plus claire, et à diminuer simultanément la valeur des éclaircissements horizontal et vertical de manière à conserver la luminance de chaussée à la valeur initiale.

Initialement le coefficient de clarté de la chaussée est ρ_{ch1} sa luminance a pour valeur L_{ch} , l'éclairement horizontal est E_{h1} , l'éclairement vertical (hors influence de la chaussée) est E_{v1} . Elle est

remplacée par une chaussée de coefficient de clarté ρ_{ch2} , sa luminance reste L_{ch} , l'éclairement horizontal devient E_{h2} , et l'éclairement vertical (hors influence de la chaussée) E_{v2} .

La luminance d'une cible en limite de visibilité avec la première chaussée vérifie:

$$L_{obj1} = \frac{\rho_{obj}}{\pi} \times \left(E_{v1} + L_{ch} \times \frac{\pi}{2} \right) = L_{ch} + \Delta L(L_{adap1}), \text{ où } L_{adap1} \text{ est la luminance d'adaptation du}$$

conducteur. L'éclairement vertical arrivant sur la cible est en effet égal à la somme de l'éclairement vertical fourni par l'installation et par les piédroits, et de celui fourni par les réflexions sur la

$$\text{chaussée. } E_{vtot1} = E_{v1} + L_{ch} \times \frac{\pi}{2}$$

$$\text{La chaussée est telle que: } L_{ch} = \rho_{ch1} \times \frac{E_{h1}}{\pi}.$$

Après changement de chaussée et diminution des éclairagements, on obtient:

- L_{ch} est inchangée;

$$\text{- les éclairagements deviennent: } E_{h2} = \frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}} \times E_{h1} \text{ et } E_{v2} = \frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}} \times E_{v1};$$

- la luminance de la cible est changée en:

$$\text{- } L_{obj2} = \frac{\rho_{obj}}{\pi} \times \left(E_{v2} + L_{ch} \times \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\rho_{obj}}{\pi} \times \left(\frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}} E_{v1} + L_{ch} \times \frac{\pi}{2} \right) < L_{obj1}.$$

La luminance d'adaptation devient L_{adap2} , légèrement inférieure à L_{adap1} , car les piédroits sont moins éclairés. Le seuil minimal perceptible diminue donc (en valeur absolue).

Donc le contraste entre la luminance de l'objet et la chaussée augmente. Comme la luminance d'adaptation varie peu, les conditions de limite de visibilité ne changent pas et la visibilité de la cible augmente.

L'évolution du paramètre de contraste est la suivante:

$$\frac{1}{p_2} = \frac{E_{v2} + L_{ch} \times \frac{\pi}{2}}{L_{ch}} = \frac{\left(\frac{\rho_{ch1}}{\rho_{ch2}} \times E_{v1} + L_{ch} \times \frac{\pi}{2} \right)}{L_{ch}} < \frac{\left(E_{v1} + L_{ch} \times \frac{\pi}{2} \right)}{L_{ch}} = \frac{1}{p_1}.$$

Le paramètre de qualité de contraste augmente.

L'utilisation d'une chaussée plus claire et la diminution simultanée des éclairagements fournis par l'installation entraîneront une augmentation de la visibilité et une augmentation du paramètre de qualité de contraste de l'installation.

7. Bibliographie :

- [1] Guide de l'Eclairage des Tunnels Routiers. CETU 1985.
- [2] Dossier Pilote des Tunnels, Document n°4 : Equipements, fascicule 4.2 : Eclairage. CETU 1997.
- [3] "Guide for the lighting of road tunnels and underpasses. Publication CIE N°88-2 Draft 2.
- [4] "Standard For the Lighting of Road Tunnels" . CEN/TC 169/WG6 N72 9 th draft.
- [5] "Les Modèles de Visibilité". A.M. SERRES Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées Mai Juin 1991.
- [6] Publication CIE N° 19: "A unified Framework of Methods for Evaluating Visual Performances Aspects of Ligthing". Technical report of the CIE 1972.
- [7] LUX N°161: "Visibilité de Cibles Modèle de Calcul". ADRIAN Traduit par J. LECOCQ. Janvier Février 1991.
- [8] Interprétations et Résultats Pratiques des Expériences de M J.B. DE BOER au sujet de l'Eclairage de Transition dans les Entrées de Tunnel.
- [9] "L'Eclairage des Entrées de Tunnel vu du Point de Vue Physiologique Optique" par D. A. SCHREUDER. Philips Technical Review tome 27.
- [10] "Introduction à l'Eclairagisme". Marc LA TOISON. EYROLLES
- [11] "A method for the Design of Tunnel Entrance". ADRIAN. JOURNAL of the Illuminating Engineering Society 1990.
- [12] "Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting". CIE Publication 30.2 1990.