

# Propriétés de réflexion des surfaces

## Le gonioréfectomètre du LCPC

### Performances et perspectives d'études

**Jean-Marie COULOMB**  
Ingénieur des Travaux publics de l'État

**Corinne BRUSQUE**  
Ingénieur des Travaux publics de l'État  
Chef de la section Exploitation de la route et visibilité

Division Exploitation, signalisation, éclairage  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

#### RÉSUMÉ

Le gonioréfectomètre du laboratoire de photométrie du LCPC a été conçu afin de caractériser le pouvoir de réflexion des matériaux de génie civil. Il permet de mesurer les variations spatiales du coefficient de luminance en fonction des directions d'éclairage et d'observation du matériau.

La qualification de l'appareil est présentée. Elle a été réalisée pour des conditions de mesures correspondant à l'éclairage routier, c'est-à-dire pour un angle d'observation égal à 1° représentatif de la conduite automobile. On montre que les incertitudes de mesures n'ont pas de conséquences notables sur la qualité de service de l'installation d'éclairage.

La méthode de mesure mise au point pour estimer les variations spatiales du coefficient de luminance est décrite. Les premières mesures, réalisées par le laboratoire de photométrie, sont commentées et on présente les perspectives d'études offertes par ce nouvel équipement.

**MOTS CLÉS :** 23-85 - Appareil de mesure - Photométrie - réflexion - Angle - Matériau - Relevé topographique - Luminance - Mesure - Revêtement (chaussée) - Qualité de service.

#### Introduction

Pendant longtemps, la photométrie des surfaces de matériaux n'a intéressé que les professionnels de l'éclairage. La Commission internationale de l'Éclairage (CIE) a publié une série de recommandations à leur intention, dans le but de leur fournir des informations nécessaires au dimensionnement d'installations d'éclairage.

Aujourd'hui, les industries de la route développent des produits nouveaux pour répondre à des demandes de plus en plus précises en matière de confort, d'aménagement, ou d'économie d'énergie. Les enrobés drainants ou les revêtements clairs ou colorés en sont des exemples.

Les professionnels de la route sont, de plus, tenus dans certains marchés de respecter des exigences photométriques. Cela entraîne donc une demande plus forte dans le domaine de la photométrie des surfaces des chaussées.

Par ailleurs, l'éclairage des villes prend une place importante. En effet, l'éclairage des rues, des places, des lieux de rencontres, des quartiers est une composante essentielle dans l'aménagement urbain. L'utilisation de la lumière est un des moyens de rendre la ville plus sûre, plus agréable, plus conviviale.

Là encore, la connaissance de la photométrie des matériaux (chaussée, mais aussi bâtiments, mobiliers urbains, etc.) est importante.

On peut comprendre que les besoins en matière de caractéristiques photométriques des matériaux soient différents suivant les cas.

Dans le cas de l'éclairage des routes, on ne s'intéresse qu'à la chaussée et à la perception qu'en a un automobiliste.

Dans le cas de l'éclairage urbain, on s'intéresse à un environnement complexe et à la perception de l'environnement pour une personne située n'importe où dans ce site.

Cependant, qu'il s'agisse de l'éclairage des routes ou des rues, la connaissance des caractéristiques photométriques des matériaux est un élément essentiel dans les choix techniques des concepteurs d'installations d'éclairage public et des aménageurs, car elles conditionnent la sécurité et le confort des usagers.

### Propriétés de réflexion des matériaux

La perception visuelle d'un objet est possible parce que l'objet renvoie une partie du rayonnement lumineux vers l'œil de l'observateur.

Pour chaque matériau en interaction avec un rayonnement électromagnétique, on observe les trois phénomènes d'absorption, de réflexion et de transmission, dans des proportions variables selon les matériaux.

Dans le cas présent, on s'intéresse aux propriétés de réflexion des matériaux et à la partie visible du rayonnement.

Les propriétés de réflexion d'un matériau sont déterminées par l'intermédiaire du coefficient de luminance  $q$ .

Le coefficient de luminance  $q$  est défini par le quotient de la luminance d'une surface  $L$  (impression lumineuse reçue par un observateur regardant la surface) par l'éclairement de cette même surface  $E$  ; il s'exprime en  $cd/m^2/lux$  :

$$q = \frac{L}{E}$$

Le coefficient de luminance dépend des paramètres suivants :

- la nature du revêtement,
- l'état de surface du matériau,
- la direction d'éclairage de la surface,
- la direction d'observation de la surface.

Pour un revêtement donné, le coefficient de luminance  $q$  dépend donc de deux directions définies par quatre angles (fig. 1) :

- $\alpha$  : angle d'observation,
- $\beta$  : angle entre le plan d'éclairage et le plan d'observation,
- $\gamma$  : angle d'éclairage,
- $\delta$  : angle entre le plan d'observation et l'axe de la route.

Pour un revêtement donné, le coefficient de luminance est  $q(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ .

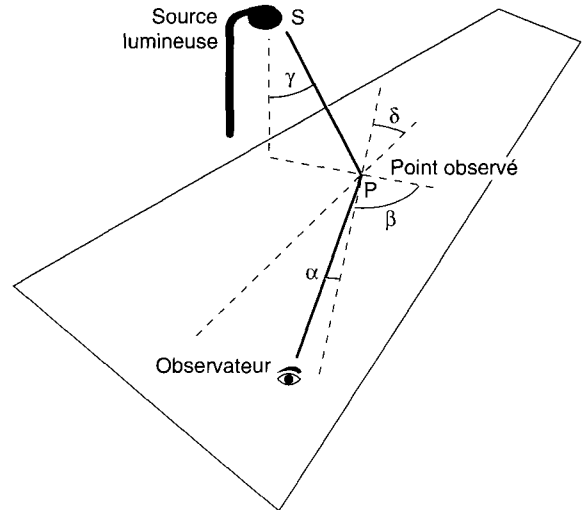


Fig. 1 - Définition des angles pour la mesure du coefficient de luminance.

### Le gonioréfectomètre

Le gonioréfectomètre du Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) a été conçu dans le but de caractériser photométriquement les matériaux à partir des valeurs des coefficients de luminance pour différentes valeurs de  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ .

Le gonioréfectomètre (fig. 2) possède actuellement trois degrés de liberté  $\alpha, \beta, \gamma$ . Les mouvements sont assurés par trois moteurs  $MT\alpha, MT\beta, MT\gamma$ . L'angle  $\delta$  est pour le moment figé ; on suppose que les matériaux sont isotropes en luminance. Il est cependant possible d'activer ce mouvement si on le désire.

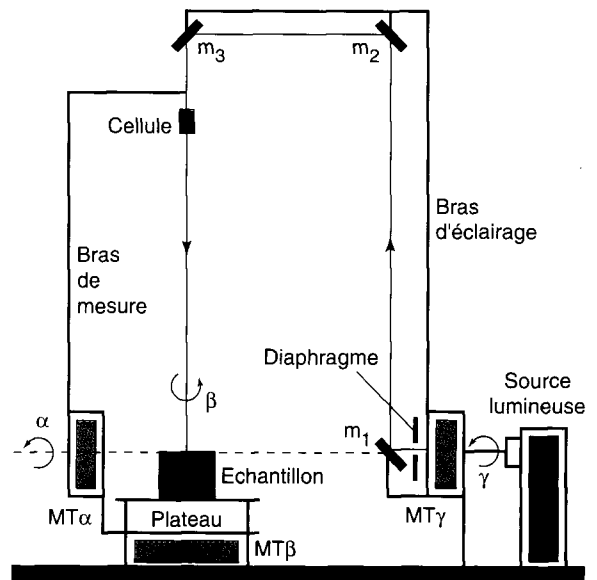


Fig. 2 - Schéma de principe du gonioréfectomètre.

La source lumineuse (lampe halogène 250 W) est fixe. Le faisceau lumineux est envoyé sur l'échantillon à mesurer par un jeu de miroirs ( $m_1, m_2, m_3$ ). La lumière, réfléchiée par l'échantillon dans une direction donnée, est captée par une cellule photoélectrique située à l'extrémité du bras de mesure. Cette cellule possède une sensibilité spectrale correspondant à la courbe d'efficacité relative « photopique »  $V(\lambda)$  de l'observateur de référence, défini par la CIE.

L'échantillon est placé sur un plateau, solidaire du bras de mesure. Ce plateau peut tourner sur lui-même à l'aide du moteur  $MT\beta$ .

Les angles d'éclairage et d'observation varient grâce aux moteurs  $MT\gamma$  et  $MT\alpha$ .

Il est donc possible d'explorer une demi-sphère au-dessus de l'échantillon (fig. 3). La mesure automatisée des coefficients de luminance  $q$  est possible sur une demi-sphère.

Lorsque l'angle d'éclairage augmente (devient rasant), la surface éclairée sur l'échantillon croît. Or, le principe de mesure de l'appareil est de maintenir la surface éclairée constante. C'est pourquoi on a placé un diaphragme d'ouverture variable devant la source lumineuse (fig. 2). Celui-ci permet de corriger la surface éclairée pour chaque angle d'éclairage.

Plus l'angle d'éclairage devient rasant, plus le diaphragme se ferme (fig. 4).

Le diaphragme a deux volets commandés par deux moteurs.

Le principe de mesure est le suivant :

$$q = \frac{L}{E}$$

L'éclairement sur la surface vaut :

$$E = E_{\perp} \cdot \cos \gamma$$

$E_{\perp}$  étant l'éclairement mesuré dans le plan perpendiculaire à la direction incidente de la lumière.

La luminance de la surface, dans la direction de mesure faisant l'angle  $\alpha$  par rapport à la surface, est déterminée en mesurant l'intensité lumineuse réfléchiée par cette surface :

$$L = \frac{I}{S \cdot \sin \alpha}$$

$I$  est déterminé en mesurant l'éclairement  $E_r$  reçu par la cellule en provenance de l'échantillon situé à une distance  $d$  :

$$I = E_r \cdot d^2$$

d'où :

$$L = \frac{E_r \cdot d^2}{S \cdot \sin \alpha}$$

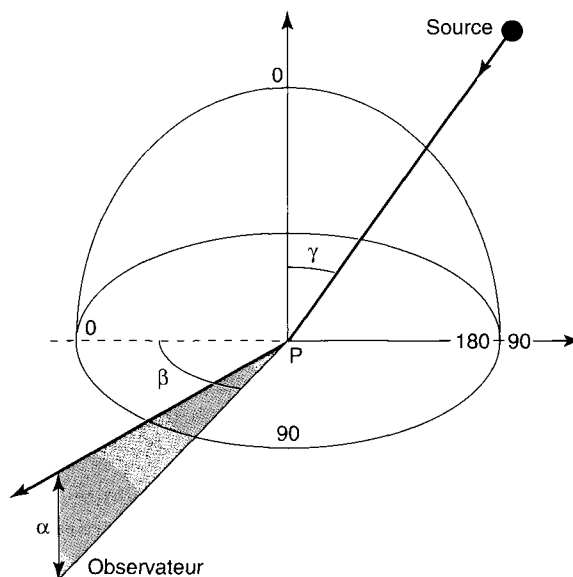


Fig. 3 - Zone d'auscultation de l'appareil.

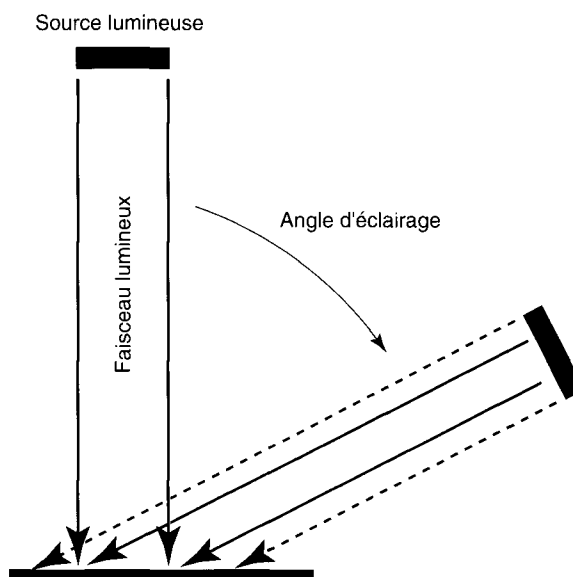


Fig. 4 - Schéma de principe du goniorélectromètre.

et

$$q = \frac{E_r \cdot d^2}{S \cdot E_{\perp} \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

avec :

- $d$  : distance échantillon cellule (150 cm),
- $S$  : surface éclairée (10 cm  $\times$  10 cm),
- $\gamma$  : angle d'éclairage,
- $\alpha$  : angle d'observation,
- $E_r$  : éclairement mesuré,
- $E_{\perp}$  : éclairement mesuré dans le plan perpendiculaire à la direction incidente de la lumière.

La valeur du coefficient de luminance s'obtient donc indirectement par la connaissance de certains paramètres et par la mesure des éclairagements.

## Mesure des caractéristiques photométriques des matériaux de chaussées

La CIE a défini la méthode de mesure du coefficient de luminance de la chaussée, ainsi que les règles de calcul des installations d'éclairage [1] et [2].

Dans des conditions normales de conduite automobile, le conducteur observe une portion de route située à une distance comprise entre 60 et 160 m devant lui. On considère que les yeux du conducteur sont à une hauteur de 1,5 m du sol. Dans ces conditions, l'angle d'observation  $\alpha$  est compris entre 0,5 et 1,5° et l'angle  $\delta$  est toujours inférieur à 20°.

Pour  $\alpha$  compris 0,5 et 1,5°, les variations du coefficient de luminance sont faibles. Il a donc été convenu de prendre  $\alpha$  égal à 1°.

De plus, on a admis que les surfaces routières sont isotropes pour  $\delta$  inférieur à 20°.

L'expression de  $q$  devient donc :

$$q = q(1^\circ, \beta, \gamma)$$

La mesure du coefficient de luminance se fait pour vingt valeurs de  $\beta$  comprises entre 0 et 180° et vingt-neuf valeurs de tangente  $\gamma$  comprises entre 0 et 12.

Pour faciliter le calcul de la luminance, on a défini le coefficient réduit de luminance  $r$  :

$$r = r(\beta, \gamma) = q(\beta, \gamma) \cos^3 \gamma$$

La luminance  $L$ , en un point de la chaussée éclairée par un seul luminaire, est donnée par la formule suivante :

$$L = qE = q \frac{I}{h^2} \cos^3 \gamma = r \frac{I}{h^2}$$

où :

- $E$  est l'éclairement reçu au point de la chaussée,
- $I$  est l'intensité lumineuse du luminaire dans la direction du point,
- $h$  est la hauteur du luminaire.

À partir des 580 valeurs  $q(1^\circ, \beta, \gamma)$ , on calcule trois paramètres caractéristiques de la réponse photométrique du matériau :

- le coefficient de luminance moyenne  $Q_0$ ,
- les coefficients de spécularité  $S_1$  et  $S_2$ .

Ces paramètres sont définis ainsi :

$$Q_0 = \frac{\int_0^{\Omega_0} q \, d\Omega}{\Omega_0} \text{ avec } d\Omega = \sin \gamma \, d\gamma \, d\beta$$

$$S_1 = \frac{r(0, 2)}{r(0, 0)}$$

$$S_2 = \frac{Q_0}{r(0, 0)}$$

avec :

-  $\Omega_0$  : angle solide, mesuré en un point de la chaussée, contenant toutes les directions suivant lesquelles l'énergie lumineuse en provenance d'un luminaire sera prise en compte pour le calcul de la luminance en ce point ;

-  $r(0, 2)$  : valeur du coefficient de luminance réduit pour  $\beta = 0^\circ$  et  $\tan \gamma = 2$  ;

-  $r(0, 0)$  : valeur du coefficient de luminance réduit pour  $\beta = 0^\circ$  et  $\tan \gamma = 0$ .

L'incertitude sur la valeur du coefficient de luminance a une conséquence directe sur le calcul de l'installation d'éclairage, pour lequel on utilise les 580 valeurs de  $q(1^\circ, \beta, \gamma)$ .

On a évalué la précision sur les valeurs du coefficient de luminance dans les conditions de mesure définies pour les applications en éclairage public. Dans ce cas, on peut déduire en effet de l'incertitude sur les valeurs de  $q(1^\circ, \beta, \gamma)$  les erreurs sur les caractéristiques photométriques  $Q_0, S_1$  et  $S_2$  des matériaux et évaluer leurs conséquences sur la qualité de service d'une installation d'éclairage.

## Évaluation des performances du gonioréfectomètre

### Calcul de l'incertitude sur la mesure du coefficient de luminance

À partir de l'expression du coefficient de luminance, on détermine l'incertitude sur chaque mesure du coefficient de luminance :

$$q = \frac{E_r \cdot d^2}{S \cdot E_{\perp} \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

En différenciant la formule (1), on obtient :

$$d_q = \frac{\partial q}{\partial E_r} \cdot d_{E_r} + \frac{\partial q}{\partial E_{\perp}} \cdot d_{E_{\perp}} + \frac{\partial q}{\partial d} \cdot dd + \frac{\partial q}{\partial S} \cdot d_S + \frac{\partial q}{\partial \alpha} \cdot d_{\alpha} + \frac{\partial q}{\partial \gamma} \cdot d_{\gamma}$$

Les erreurs sur les différentes grandeurs permettant de calculer  $q$  sont statistiquement indépendantes. Il est donc possible de déterminer l'incertitude type composée sur le coefficient de

luminance  $q$ . Elle est donnée par la relation suivante :

$$\frac{s_d}{q} = \sqrt{\frac{1}{E_r^2} s_{Er}^2 + \frac{1}{E_{\perp}^2} s_{E_{\perp}}^2 + \frac{4}{d^2} s_d^2 + \frac{1}{s^2} s_s^2 + \frac{1}{\tan^2 \alpha} s_{\alpha}^2 + \tan^2 \gamma \cdot s_{\gamma}^2} \quad (2)$$

La formule (1) met en évidence deux types de paramètres :

- les paramètres d'influence :  $d$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $S$ ,
- les paramètres de mesure :  $E_r$ ,  $E_{\perp}$ .

Dans les conditions les plus défavorables, on obtient les incertitudes types maximales sur les angles  $\alpha$ ,  $\gamma$  :

> Pour  $\alpha = 1^{\circ}$  :

$$\frac{1}{\tan \alpha} \cdot s_{\alpha} = \frac{3,5E-4}{\tan 1^{\circ}} = 0,02$$

> Pour  $\gamma = 85^{\circ}$  :

$$\tan \gamma \cdot s_{\gamma} = \tan 85^{\circ} \cdot 3,5E-4 = 0,004$$

On obtient de même pour la distance entre l'échantillon et la cellule de mesure :

$$\frac{s_d}{d} = 0,002$$

La taille de la surface éclairée de  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  s'obtient en positionnant correctement les volets du diaphragme. Pour cela, on utilise une interpolation polynomiale à partir de quelques valeurs de référence. Cette interpolation introduit une certaine incertitude, fonction de l'angle d'éclairage. Cette incertitude est au maximum égale à  $2,8 \%$  :

$$\left( \frac{1}{S} \cdot s_s \right)_{\max} = 0,028$$

L'éclairement perpendiculaire à la surface de mesure est d'environ  $1\,900 \text{ lux}$ .

L'incertitude type composée liée à l'éclairement  $E_{\perp}$  est de  $1,3 \%$ . Cela comprend les incertitudes concernant la stabilité de la source lumineuse dans le temps et la précision de l'appareil de mesure.

Enfin, à l'éclairement  $E_r$  mesuré pour chaque valeur de coefficient de luminance est associée une incertitude type de  $1 \%$ .

Elle comprend l'incertitude liée à la chaîne de mesure, ainsi que l'incertitude liée au positionnement des échantillons.

À partir de la formule (2), on détermine l'incertitude type composée sur chaque valeur du coefficient de luminance  $q$ .

Les incertitudes types composées sur les paramètres  $Q_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$  sont estimées à partir de l'incertitude sur  $q$ .

#### ■ Incertitude type sur $Q_0$ :

$$Q_0 = \frac{\int_0^{\Omega_0} q \, d\Omega}{\Omega_0}$$

avec :  $d\Omega : \sin \gamma \, d\gamma \, d\beta$

On calcule l'intégrale et on obtient :

$$Q_0 = Q_0 \pm 3,5 \%$$

#### ■ Incertitude type composée sur $S_1$ :

$$S_1 = \frac{r(0; 2)}{r(0; 0)}$$

avec :

$$r(\beta; \gamma) = q(\beta; \gamma) \cdot \cos^3 \gamma$$

vaut :

$$\frac{s_r}{r} = \sqrt{\frac{1}{E_r^2} s_{Er}^2 + \frac{1}{E_{\perp}^2} s_{E_{\perp}}^2 + \frac{4}{d^2} s_d^2 + \frac{1}{s^2} s_s^2 + \frac{1}{\tan^2 \alpha} s_{\alpha}^2 + 4 \tan^2 \gamma \cdot s_{\gamma}^2}$$

et on peut ainsi calculer l'incertitude sur  $S_1$  :

$$\frac{S_{s1}}{S_1} = \frac{S_{r(0; 2)}}{r(0; 2)} + \frac{S_{r(0; 0)}}{r(0; 0)}$$

$$S_1 = S_1 \pm 7 \%$$

#### ■ Incertitude type composée sur $S_2$ :

$$S_2 = \frac{Q_0}{r(0; 0)}$$

$$\frac{S_{s2}}{S_2} = \frac{S_{Q0}}{Q_0} + \frac{S_{r(0; 0)}}{r(0; 0)}$$

$$S_2 = S_2 \pm 7 \%$$

Dans le cas des revêtements routiers, qui sont des matériaux complexes au plan photométrique (surface non homogène et teinte sombre), on détermine la précision de mesure sur les trois indices globaux  $Q_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  caractérisant ces matériaux.

L'incertitude type composée vaut :

- $3,5 \%$  sur  $Q_0$ ,
- $7 \%$  sur  $S_1$ ,
- $7 \%$  sur  $S_2$ .

Il faut noter que les géométries de mesure recommandées par la CIE pour les revêtements routiers sont très défavorables ( $\alpha$  petit et  $\gamma$  grand). Dans le cas de mesures plus générales ( $1^{\circ} < \alpha < 90^{\circ}$  et  $0^{\circ} < \gamma < 85^{\circ}$ ), les incertitudes sur les coefficients de luminance seront évidemment moindres.

TABLEAU I  
Résultats des mesures sur un BBTM et un BBDR  
(cinq mesures)

BBTM	Moyenne	Coefficient de variation (%)
$Q_0$	0,070	2,8
$S_1$	0,447	1
$S_2$	1,660	1,2
BBDR	Moyenne	Coefficient de variation (%)
$Q_0$	0,056	3
$S_1$	1,932	2,4
$S_2$	2,974	1,6

TABLEAU II  
Caractéristiques de l'éclairage de la chaussée en  
BBTM et en BBDR éclairée par les luminaires intensifs

BBTM	Moyenne	Coefficient de variation (%)
$L_{moy}$	1,66	2,8
$U_g$	0,62	0,7
$U_l$	0,84	0,5
BBDR	Moyenne	Coefficient de variation (%)
$L_{moy}$	1,84	3
$U_g$	0,56	0,8
$U_l$	0,85	0,6

TABLEAU III  
Caractéristiques de l'éclairage de la chaussée en  
BBTM et en BBDR éclairée par les luminaires extensifs

BBTM	Moyenne	Coefficient de variation (%)
$L_{moy}$	1,58	2,8
$U_g$	0,66	0
$U_l$	0,74	0,7
BBDR	Moyenne	Coefficient de variation (%)
$L_{moy}$	1,70	3
$U_g$	0,50	1,8
$U_l$	0,79	0,7

## Reproductibilité des mesures

Pour deux types de matériaux, un béton bitumineux très mince (BBTM), aux caractéristiques photométriques classiques et un béton bitumineux drainant (BBDR), particulièrement spéculaire, on a effectué des mesures de reproductibilité selon les recommandations de la CIE, soit 580 points de mesure. Cinq mesures ont été réalisées pour chaque matériau. Les résultats sont donnés dans le tableau I.

Pour les deux matériaux, la reproductibilité des mesures correspond à une incertitude type :

- 3 % pour  $Q_0$ ,
- < 2,5 % pour  $S_1$ ,
- < 2 % pour  $S_2$ .

Les incertitudes types calculées précédemment par la formule (2) sont plus importantes, ce qui est logique.

## Évaluation de l'influence des incertitudes de mesure sur la qualité de service d'une installation d'éclairage

La qualité de service d'une installation d'éclairage est estimée à l'aide des quatre paramètres suivants :

- l'éclairement moyen de la chaussée,
- la luminance moyenne de la chaussée,
- l'uniformité générale de la luminance,
- l'uniformité longitudinale de la luminance.

Ces différents facteurs sont déterminés à partir d'un modèle de calcul qui prend en compte :

- les données géométriques de l'installation (hauteur, espacement, distance à la voie et inclinaison des luminaires),
- la répartition des intensités lumineuses, la puissance et le flux lumineux des sources,
- les caractéristiques photométriques de la chaussée éclairée estimées par le coefficient de luminance  $q(l^\circ, \beta, \gamma)$ .

On s'est intéressé à l'éclairage d'une chaussée à deux voies de 3,5 m. Les installations retenues sont de type unilatéral simple, et diffèrent par la répartition des intensités lumineuses des sources ; l'une est équipée de luminaires de type intensif, l'autre de luminaires de type extensif.

Les données relatives aux installations étant fixées, on a procédé aux calculs d'éclairage pour les deux types de revêtements BBTM et BBDR, en utilisant les cinq séries de mesure du coefficient de luminance. À partir de ces résultats, on a déterminé la moyenne et le coefficient de variation des trois paramètres déterminants pour la visibilité de la route :

- la luminance moyenne  $L_{moy}$ ,
- l'uniformité générale  $U_g$ ,
- l'uniformité longitudinale  $U_l$ .

Pour juger de l'influence de l'incertitude des mesures du coefficient de luminance sur la qualité de service de l'installation d'éclairage, on compare les valeurs  $L_{\text{moy}}$ ,  $U_g$  et  $U_1$  calculées aux valeurs limites données dans les recommandations pour l'éclairage extérieur pour le type de voie considérée [3] :

- luminance moyenne  $\geq 1,5 \text{ cd/m}^2$ ,
- uniformité longitudinale  $\geq 0,7$ ,
- uniformité générale  $\geq 0,4$ .

Les résultats sont donnés dans les tableaux II et III.

L'incertitude sur la valeur du coefficient de luminance moyen  $Q_0$  agit directement sur la valeur de la luminance moyenne. C'est pourquoi il n'est pas recommandé de se caler exactement sur la valeur limite  $L_{\text{moy}} = 1,5 \text{ cd/m}^2$ . Cependant, la valeur maximale de l'incertitude (3 %) n'est pas très importante et ne remet pas fondamentalement en cause le choix de l'installation d'éclairage.

Par contre, les cinq mesures des revêtements BBTM et BBDP ne présentent pas de différences significatives en ce qui concerne  $S_1$  ; c'est pourquoi le coefficient de variation lié aux uniformités est très faible pour chacune des deux installations d'éclairage.

La mesure des coefficients de luminance pour un revêtement routier, suivant les recommandations de la CIE, est possible et la précision de cette mesure est déterminée. On constate que la précision est tout à fait suffisante pour le dimensionnement des installations d'éclairage public.

La précision dépend bien sûr de chaque matériau, mais on peut dire qu'elle est représentative de la précision que l'on obtiendrait sur d'autres revêtements routiers.

Le goniorélectromètre a toutefois été conçu pour caractériser des matériaux de toutes natures, sous des angles d'observation différents. La précision de mesure sur des matériaux plus homogènes serait bien évidemment meilleure. Il en serait de même pour les mesures sous des angles d'observation différents ( $\alpha$  supérieur à  $1^\circ$ ).

## Perspectives d'étude à l'aide du goniorélectromètre

L'éclairage d'un site complexe, comme par exemple un site urbain, pose un réel problème. La chaussée n'est plus la seule surface à éclairer et l'éclairage concerne tous les objets présents dans la scène urbaine (la chaussée, les trottoirs, le bâti, le mobilier urbain, les piétons, etc.). De plus, les automobilistes ne sont plus les seuls usagers du site. Enfin, chaque objet de la scène

participe indirectement, par le phénomène des inter-réflexions, à l'éclairage du site.

Pour ces différentes raisons, il est nécessaire de connaître les variations du coefficient de luminance pour l'ensemble des directions d'observation et d'éclairage décrivant le demi-hémisphère supérieur à la surface du matériau.

Dans sa conception actuelle, l'appareil permet la mesure des variations de  $q$  suivant les angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  pour :

$$\alpha \in [0^\circ, 90^\circ], \beta \in [0^\circ, 180^\circ] \text{ et } \gamma \in [0^\circ, 90^\circ]$$

On fait donc l'hypothèse que les matériaux sont isotropes et que l'on peut négliger les variations de  $q$  suivant  $\delta$ . Cette hypothèse devra être validée dans le futur.

Le principe de mesure utilisé par le goniorélectromètre du LCPC ne permet pas de mesurer les variations de  $q$  pour l'ensemble des angles définis précédemment :

- l'angle d'éclairage  $\gamma$  ne peut être supérieur à  $85^\circ$ , car au-delà de cette limite la rugosité du matériau entraîne des phénomènes d'ombre et il n'est plus possible de conserver une surface de mesure constante ;
- les directions d'éclairage  $\alpha$  et d'observation  $\beta$  doivent présenter un écart angulaire minimal de l'ordre de  $3^\circ$ .

Le choix des valeurs d'angles retenues pour réaliser la mesure du coefficient de luminance  $q$  est fonction, d'une part, de ces limitations techniques et, d'autre part, de la présence de directions privilégiées de réflexion.

Classiquement, on distingue trois modèles de réflexion (fig. 5) :

- la réflexion diffuse,
- la réflexion spéculaire,
- la rétro-réflexion.

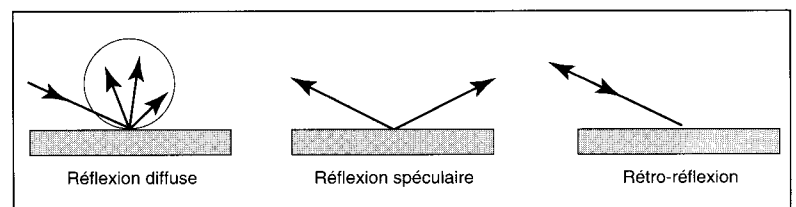


Fig. 5 - Les trois modèles théoriques de réflexion.

Pratiquement, on ne rencontre jamais une surface réfléchissant la lumière suivant un de ces trois modèles théoriques. La plupart des revêtements réfléchissent la lumière d'une manière plus au moins diffuse, une partie de l'énergie lumineuse étant réfléchie dans une direction proche de la direction spéculaire et une autre partie pouvant être éventuellement réfléchie dans une direction proche de la direction de rétro-

réflexion. On parle alors de réflexion mixte. En fonction de l'importance relative de l'énergie réfléchie suivant ces deux directions privilégiées de réflexion, on dira que le matériau est « diffusant », « spéculaire » ou « rétro-réfléchissant ».

La mesure des caractéristiques photométriques multidimensionnelles des matériaux nécessite donc la mise au point d'une méthode de mesure capable d'appréhender les différents modes de réflexion des matériaux. Les grands principes de la méthode mise au point sont présentés dans la suite de l'article. Ils reposent sur des essais réalisés sur quatre types de matériaux.

Pour estimer la composante diffuse de la réflexion, on a défini tout d'abord un maillage assez grossier de l'espace de mesure, le nombre de points de mesure étant limité à 1 540. Les valeurs des angles sont indiquées dans le tableau IV.

TABLEAU V  
Valeurs des angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  utilisées pour mesurer la composante diffuse de la réflexion

Angles (°)	Nombre	Valeurs
$\gamma$	10	0 10 20 30 40 50 60 70 80 85
$\beta$	14	0 2 5 10 20 30 60 90 130 160 170 175 178 180
$\alpha$	11	1 5 10 20 30 40 50 60 70 80 90

Pour les angles  $\beta$  proches de la direction de spéularité ( $\beta = 0^\circ$ ) et de la direction de rétro-réflexion ( $\beta = 180^\circ$ ), on a resserré le pas de mesure afin de déterminer avec plus de finesse les pics de réflexion spéculaire et de rétro-réflexion. Pour les plans  $\beta = 0^\circ, 2^\circ, 178^\circ$  et  $180^\circ$ , les mesures sont réalisées tous les deux degrés en  $\alpha$  (soit 45 points de mesure) et pour les plans  $\beta = 5^\circ, 10^\circ, 170^\circ$  et  $175^\circ$ , tous les cinq degrés (soit 19 points de mesure). De plus, lorsque la direction d'éclairage est normale à la surface ( $\gamma = 0^\circ$ ), les mesures en  $\alpha = 90^\circ$  sont remplacées par des mesures en  $\alpha = 85^\circ$  pour les 14 valeurs de  $\beta$ .

Compte-tenu de l'écart angulaire minimal séparant les directions d'observation et d'éclairage, le coefficient de luminance d'un matériau est connu sous la forme d'un abaque comprenant 3 156 valeurs de mesure. À titre indicatif, la durée d'une mesure complète des variations spatiales du coefficient de luminance est de l'ordre de 4 heures.

\* Matériau qui réfléchit l'intégralité de l'énergie lumineuse qu'il reçoit, suivant un modèle de réflexion diffuse. Quel que soit l'angle  $\gamma$  d'éclairage du revêtement, les paramètres  $C(\gamma)$ ,  $S(\gamma)$  et  $R(\gamma)$  prennent la valeur 1.

Pour interpréter le pouvoir de réflexion du matériau, on a choisi d'étudier les variations de l'indicatrice de réflexion de la surface en fonction de l'angle d'éclairage  $\gamma$ . L'indicatrice de réflexion est définie comme le diagramme des valeurs de l'intensité lumineuse  $I$  réfléchie par la surface suivant les directions  $\alpha$  et  $\beta$ .

Cette intensité lumineuse par unité de surface et d'éclairement est de la forme :

$$I(\alpha, \beta, \gamma) = q(\alpha, \beta, \gamma)\sin(\alpha)$$

On a introduit trois séries de paramètres pour décrire les indicatrices de réflexion d'une surface, cela afin de servir ultérieurement d'éléments de base à une typologie des caractéristiques photométriques des matériaux :

> Une série de paramètres  $C(\gamma)$  caractérisant la clarté du revêtement :

$$C(\gamma) = \int_{\Omega} q(\alpha, \beta, \gamma)\sin(\alpha) d\Omega$$

$$C(\gamma) = 2 * \int_{\beta=0}^{\pi} \int_{\alpha=0}^{\pi/2} q(\alpha, \beta, \gamma)\sin(\alpha)\cos(\alpha)d\alpha d\beta$$

> Une série de paramètres  $S(\gamma)$  caractérisant la spéularité du revêtement :

$$S(\gamma) = \frac{\int_{\alpha=0}^{\pi/2} q(\alpha, 0^\circ, \gamma)\sin(\alpha)\cos(\alpha)d\alpha}{\int_{\alpha=0}^{\pi/2} q(\alpha, 90^\circ, \gamma)\sin(\alpha)\cos(\alpha)d\alpha}$$

> Une série de paramètres  $R(\gamma)$  caractérisant la rétro-réflexion du revêtement :

$$R(\gamma) = \frac{\int_{\alpha=0}^{\pi/2} q(\alpha, 180^\circ, \gamma)\sin(\alpha)\cos(\alpha)d\alpha}{\int_{\alpha=0}^{\pi/2} q(\alpha, 90^\circ, \gamma)\sin(\alpha)\cos(\alpha)d\alpha}$$

Les variations du coefficient de luminance en fonction des angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  ont été mesurées pour les quatre échantillons suivants :

- une pastille de sulfate de baryum. Il s'agit d'un étalon utilisé en laboratoire de photométrie car ses caractéristiques photométriques sont proches de celle du diffuseur parfait\* ;
- un échantillon de peinture routière ;
- deux échantillons d'enrobés drainants, l'un prélevé à la mise en service de la chaussée et l'autre prélevé après douze mois de service.



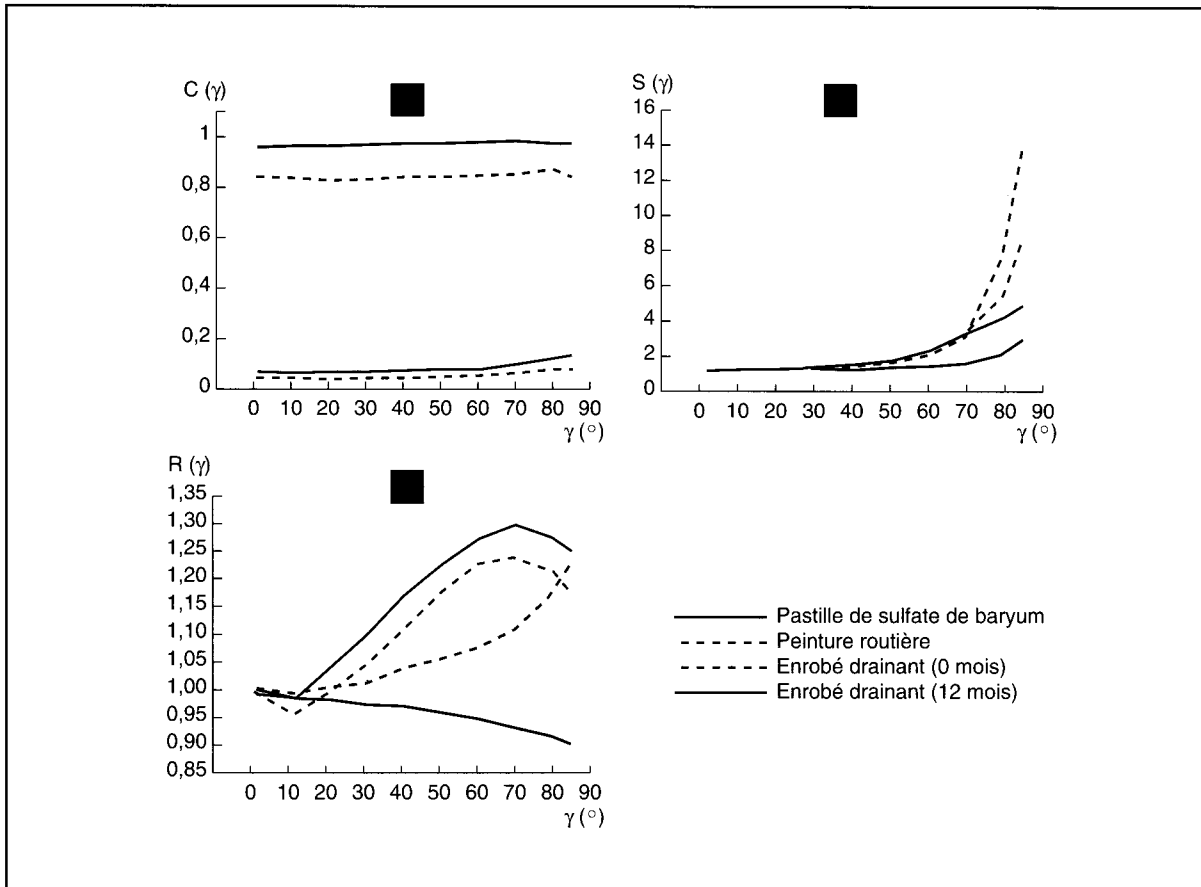


Fig. 6 - Évolution de la clarté (a), de la spécularité (b) et de la rétro-réflexion (c) des quatre revêtements étudiés en fonction de l'angle  $\gamma$  d'éclairage.

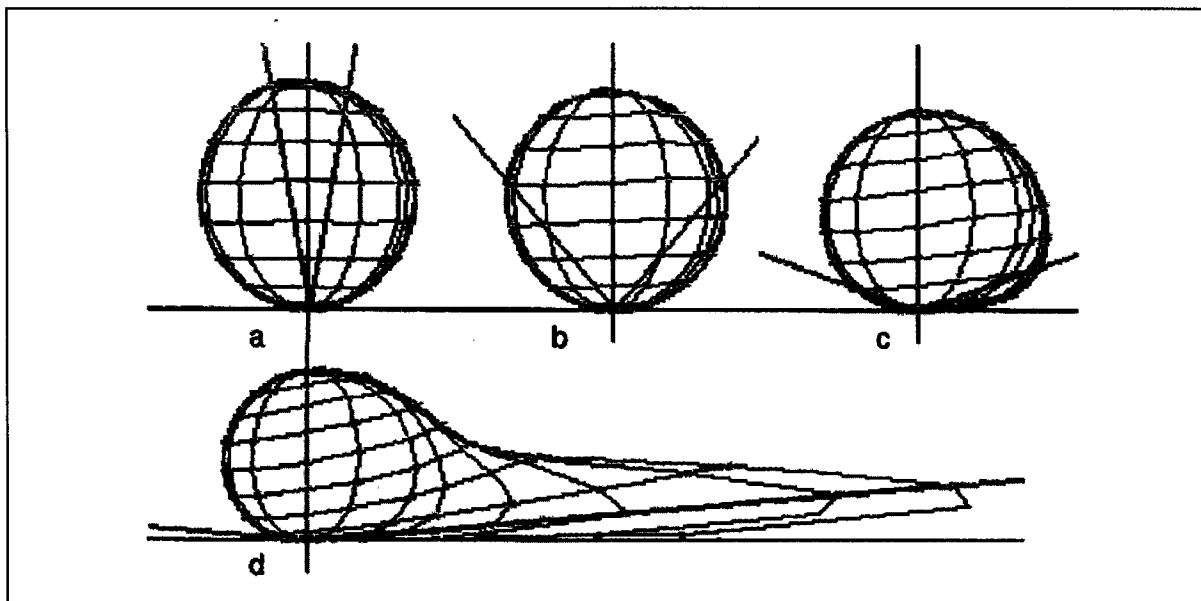


Fig. 7 - Visualisation de l'indicatrice de réflexion de la pastille de sulfate de baryum, pour différentes valeurs d'angle  $\gamma$  (a -  $\gamma = 10^\circ$ , b -  $\gamma = 40^\circ$ , c -  $\gamma = 70^\circ$ , d -  $\gamma = 85^\circ$ ).

■ L'étude du pouvoir de réflexion de la pastille de sulfate de baryum montre que, pour des angles d'éclairage proches de la normale à la surface, ce matériau peut être effectivement considéré comme un diffuseur parfait (fig. 6 et 7). Mais, pour les angles d'éclairage supérieurs à  $70^\circ$ , on ne peut plus considérer que la pastille

de sulfate de baryum réfléchit la lumière suivant un modèle de réflexion diffuse ( $S(\gamma) > 1$ ). La réflexion devient d'autant plus spéculaire que l'angle d'éclairage est rasant. Pour  $\gamma = 85^\circ$ , on constate une direction privilégiée de réflexion bien localisée autour de la direction de la réflexion spéculaire.

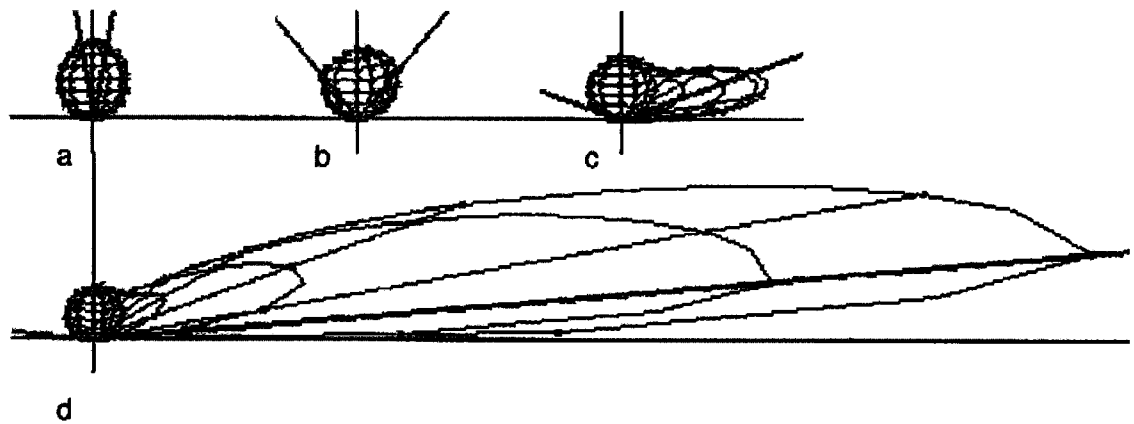


Fig. 8 - Visualisation de l'indicatrice de réflexion d'une peinture routière, pour différentes valeurs de l'angle  $\gamma$  (a -  $\gamma = 10^\circ$ , b -  $\gamma = 40^\circ$ , c -  $\gamma = 70^\circ$ , d -  $\gamma = 85^\circ$ ).

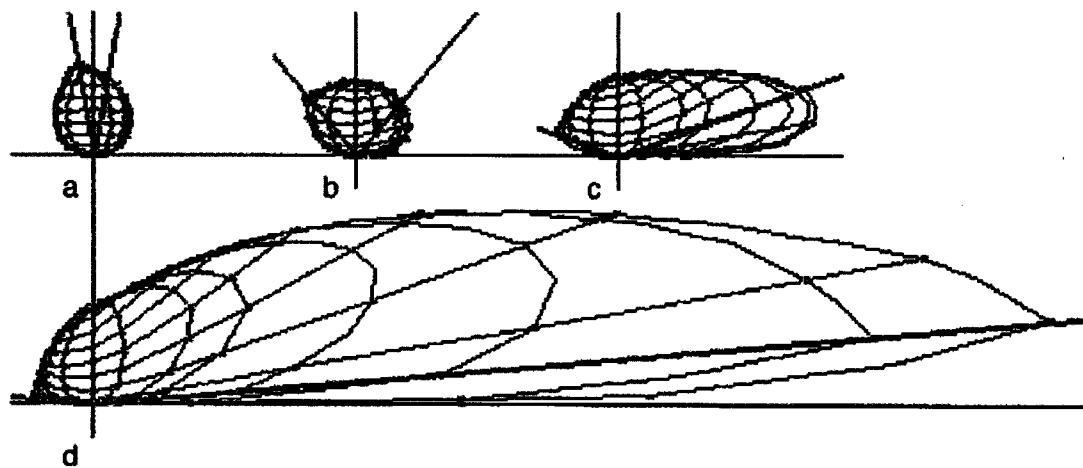


Fig. 9 - Visualisation de l'indicatrice de réflexion d'un enrobé drainant à la mise en service, pour différentes valeurs de l'angle  $\gamma$  (a -  $\gamma = 10^\circ$ , b -  $\gamma = 40^\circ$ , c -  $\gamma = 70^\circ$ , d -  $\gamma = 85^\circ$ ).

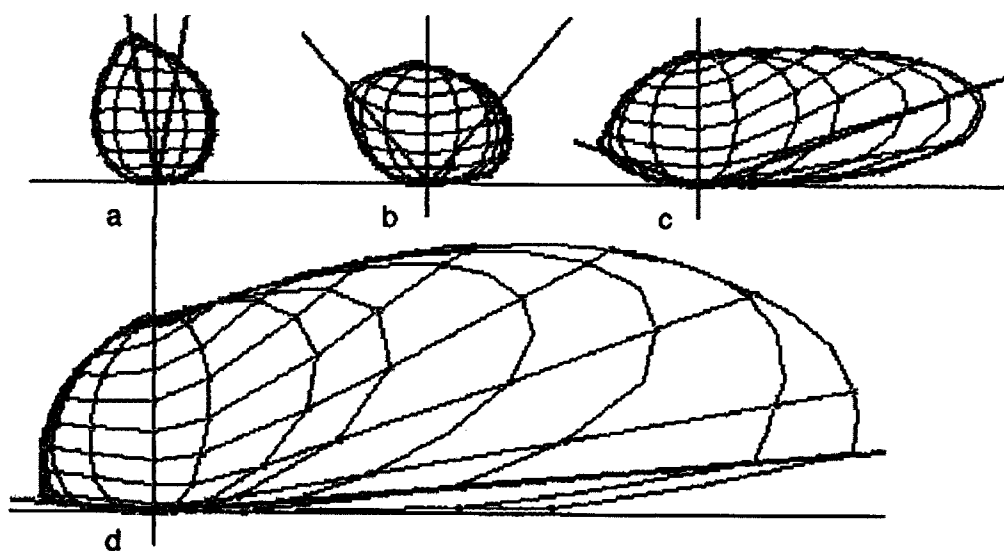


Fig. 10 - Visualisation de l'indicatrice de réflexion d'un enrobé drainant après 12 mois de service, pour différentes valeurs de l'angle  $\gamma$  (a -  $\gamma = 10^\circ$ , b -  $\gamma = 40^\circ$ , c -  $\gamma = 70^\circ$ , d -  $\gamma = 85^\circ$ ).

■ En observant l'indicatrice de réflexion de la marque routière, on distingue bien deux modes de réflexion caractéristiques de la réflexion diffuse et de la réflexion spéculaire (fig. 6 et 8). La réflexion spéculaire est ici plus importante que dans le cas de la pastille de sulfate de baryum, tant au plan de la quantité d'énergie lumineuse réfléchi vers l'avant, qu'au plan du nombre de directions d'observation pour lesquelles le phénomène de réflexion spéculaire apparaît. De plus, l'existence d'une direction privilégiée de réflexion apparaît dès  $\gamma = 40^\circ$ .

■ Pour les deux échantillons d'enrobés drainants, il est beaucoup plus difficile de différencier les deux modes de réflexion (fig. 6, 9 et 10). En effet, le domaine des directions d'observation pour lesquelles le phénomène de réflexion spéculaire apparaît est très étendu ( $\alpha \in [1^\circ, 90^\circ]$  et  $\beta \in [0^\circ, 90^\circ]$ ). On constate que, sous l'effet de la circulation, l'enrobé drainant s'éclaircit et sa spéularité diminue de façon importante. Enfin, quel que soit l'angle d'éclairage, on met en évidence un pic de rétro-réflexion d'intensité faible, mais très localisée autour de la direction de rétro-réflexion.

Ces premières mesures réalisées par le laboratoire de photométrie du LCPC permettent déjà d'avoir une idée de la variété des caractéristiques photométriques des revêtements.

## Conclusions

Le laboratoire de photométrie du LCPC dispose d'un goniorélectomètre permettant de mesurer les variations spatiales du coefficient de luminance en fonction de la direction d'éclairage et d'observation du matériau. La qualification de l'appareil, réalisée pour des conditions de mesure classiquement employées pour les calculs d'éclairage, montre que l'incertitude sur les mesures du coefficient de luminance est sans conséquence notable sur la qualité de service d'une installation d'éclairage.

Si, dans l'avenir, on souhaite définir une nouvelle description du pouvoir de réflexion des matériaux lors du dimensionnement des installations d'éclairage en site complexe, il sera nécessaire d'approfondir nos connaissances sur le pouvoir de réflexion des matériaux de génie civil et de constituer une typologie de ces revêtements sur le plan photométrique. Les indices descriptifs proposés dans cet article pourraient servir de base à cette étude. De plus, il faudrait mettre au point, simultanément, une méthode de calcul de l'éclairage direct et des inter-réflexions de la lumière prenant en compte ces nouvelles données.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Commission internationale de l'Éclairage et Association internationale permanente des Congrès de la route, (1983), *Road surfaces and lighting*, Joint technical report CIE/PIARC, 70 p.
- [2] Commission internationale de l'Éclairage, (1982), *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*, *Publication CIE 30-2* (TC - 4.6), 159 p.
- [3] Association française de l'Éclairage (1988), *Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques*, *LUX*, 202 p.

### ABSTRACT

#### Surface reflection properties - The LCPC goniorélectometer - Performance and survey possibilities

J.-M. COULOMB - C. BRUSQUE

The goniorélectometer of the LCPC photometry laboratory was designed to characterise the reflecting power of civil engineering materials. It measures the spatial variations of the luminance coefficient according to the directions of lighting and observation of the material.

The qualification of the instrument is presented. It was developed for measurement conditions corresponding to road lighting, i.e. for an observation angle equal to  $1^\circ$  representative of automobile driving. It is shown that measurement uncertainties have no significant effects on the service quality of the lighting installation.

The measurement method developed for the estimation of the spatial variations of the luminance coefficient is described. The first measurements, carried out by the photometry laboratory, are commented on and the outlook for surveys offered by this new equipment is presented.