

Journées SRBE
"Eclairage des routes et des cités"
6 mai 1998

**La photométrie des revêtements routiers :
approche classique et nouvelles tendances**

Embrechts J.J.

Maître de Recherches au Fonds National de la Recherche Scientifique (FNRS)
Service d'Acoustique et d'Eclairage, Université de Liège, Sart-Tilman B28, 4000 LIEGE 1

Résumé

L'approche classique de la photométrie des revêtements routiers est présentée. Utilisée dans les projets d'Eclairage Public, cette approche définit également un système de classification photométrique des revêtements de chaussée. A plus d'un titre, ce système se montre actuellement insuffisant, et de nouvelles approches sont explorées, notamment à l'Université de Liège.

Introduction

Dans un projet d'Eclairage Public, le revêtement de chaussée joue un rôle primordial. En effet, la chaussée éclairée constitue une part importante du champ visuel de l'observateur et, par là, elle conditionne l'état de son système visuel : notamment, le niveau de luminance auquel l'oeil de l'observateur est adapté, ainsi que son seuil de sensibilité aux contrastes, sont fortement influencés par la luminance de la chaussée. Or, ces diverses propriétés du système visuel interviennent dans la détection des obstacles et, plus généralement, dans la reconnaissance des objets : elles sont donc des facteurs importants de sécurité, une des fonctions fondamentales de l'Eclairage Public.

La luminance de la chaussée est déterminée par la quantité de lumière qu'elle reçoit et par sa propension à la réfléchir en direction de l'oeil de l'observateur. La photométrie des revêtements routiers analyse les propriétés de réflexion lumineuse de ces matériaux, dans des conditions qui sont représentatives des situations rencontrées en Eclairage Public.

Approche classique

Afin d'étudier la réflexion lumineuse par un revêtement routier, il a d'abord fallu définir les conditions d'éclairage et d'observation. Cela consiste principalement à déterminer les deux angles caractérisant la direction d'incidence de la lumière (β et γ) et les deux angles caractérisant la

direction d'observation ou de mesure de la lumière réfléchie (α et δ). Ces quatre angles sont représentés à la figure 1.

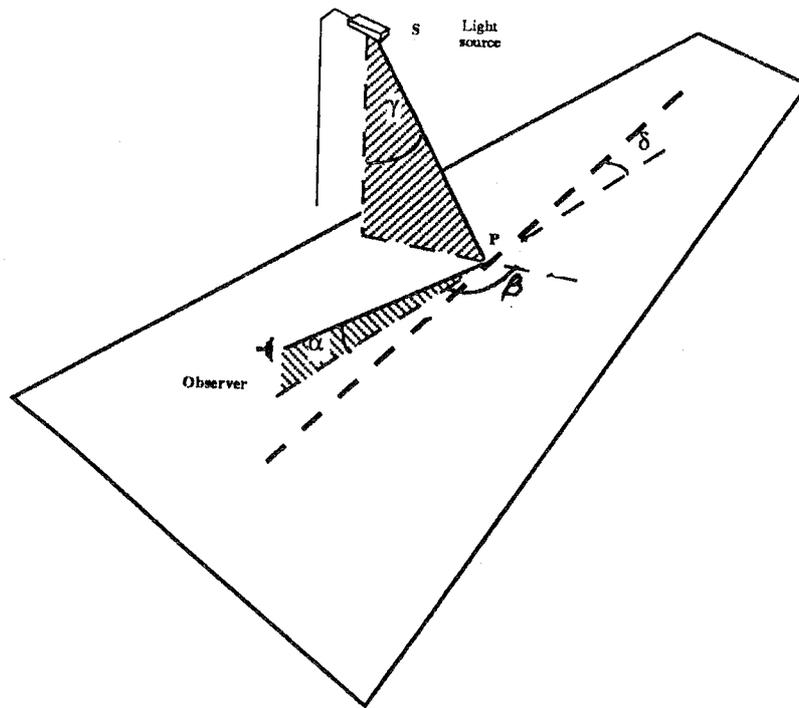


Figure 1 :

Définition des quatre angles de référence pour la photométrie classique des revêtements routiers

En éclairage routier, l'observateur est souvent situé à grande distance de la portion de route observée, ce qui conduit à des angles α de faible amplitude (typiquement entre 0.5° et 1.5°). Ces conditions d'observation rasante sont à l'origine de propriétés particulières rencontrées lors de la photométrie des revêtements de chaussée, comme la tendance au comportement spéculaire de certains matériaux. On peut également considérer que l'influence de l'angle δ sur la photométrie est faible. D'une part, cet angle est typiquement limité à l'intervalle $[0^\circ, 20^\circ]$ en éclairage routier. D'autre part, le caractère quasi-isotrope de plusieurs revêtements rend son influence négligeable.

Fin 1984, la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.) a publié, en association avec le PIARC, un document intitulé "Road Surfaces and Lighting" [1], qui sert toujours de base à l'heure actuelle à la photométrie classique des revêtements routiers. Cette approche classique considère que la direction d'observation est fixée ($\alpha=1^\circ$ et $\delta=0^\circ$) et que les propriétés de réflexion lumineuse ne dépendent donc plus que des deux angles d'incidence β et γ . Ces propriétés sont représentées par le coefficient de luminance $q(\beta, \gamma)$, c'est-à-dire le rapport entre la luminance du revêtement dans la direction d'observation fixée (L en cd/m^2) et son éclairement (E en lux).

On utilise avantageusement le coefficient réduit de luminance ($r = q \cos^3 \gamma$), car on peut montrer qu'il existe une relation simple entre la luminance d'un élément de chaussée et l'intensité lumineuse incidente (I en cd) : $L = \frac{r I}{H^2}$, H étant la hauteur des sources lumineuses (en m) par rapport à la chaussée, donc un paramètre souvent constant dans les installations d'Eclairage Public.

Le rapport CIE/PIARC définit également les valeurs particulières des angles d'incidence β et γ auxquelles il est recommandé de mesurer ou de spécifier la valeur de "r" : cfr. figure 2.

	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329
0,25	362	358	371	364	371	369	362	357	351	349	348	340	328	312	299	294	290	288	292	281
0,5	379	368	375	373	367	359	350	340	328	317	306	280	266	249	237	237	231	231	227	235
0,75	380	375	378	365	351	334	315	295	275	256	239	218	198	178	175	176	176	169	175	176
1	372	375	372	354	315	277	243	221	205	192	181	152	134	130	125	124	125	129	128	128
1,25	375	373	352	318	265	221	189	166	150	136	125	107	91	93	91	91	88	94	97	97
1,5	354	352	336	271	213	170	140	121	109	97	87	76	67	65	66	66	67	68	71	71
1,75	333	327	302	222	165	129	104	93	75	68	63	53	51	49	49	47	52	51	53	54
2	318	310	286	180	121	90	75	62	54	50	48	40	40	38	38	38	41	41	43	43
2,5	268	262	205	119	72	50	41	36	31	29	26	25	23	24	25	24	26	27	29	28
3	227	217	147	74	42	29	25	23	21	19	18	16	16	17	18	17	19	21	21	23
3,5	184	164	106	47	39	22	17	14	13	12	12	11	10	11	12	13	15	14	15	14
4	168	136	76	34	19	14	13	11	10	10	10	8	8	9	10	9	11	12	11	13
4,5	141	111	54	21	14	11	9	8	8	8	8	8	8	7	8	8	8	8	10	11
5	126	90	43	17	10	8	8	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	9
5,5	107	79	32	12	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	6	7
6	94	65	26	10	7	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6
6,5	86	56	21	8	7	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	78	50	17	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7,5	70	41	14	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
8	63	37	11	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
8,5	60	37	10	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9	56	32	9	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9,5	53	28	9	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10	52	27	7	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10,5	45	23	7	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
11	43	22	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
11,5	53	22	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
12	42	20	7	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Figure 2 :

Présentation type du coefficient réduit de luminance $r(\beta, \text{tgy})$:
 les valeurs sont multipliées par 10000 (extrait de la référence [1]).

Enfin, ce rapport propose un système de classification photométrique des revêtements, basé sur la valeur d'un paramètre appelé le facteur de spécularité $S1 = \frac{r(\beta=0, \text{tgy}=2)}{r(\beta=0, \text{tgy}=0)}$. Par exemple, la figure 3 décrit les classes RI à RIV. Signalons que le système de classification proposé s'adresse principalement aux revêtements secs.

Class	Standard table	S1-limit	R-system	
			S1 of standard	Normalised Qo value
RI	R1	$S1 < 0.42$	0.25	0.10
RII	R2	$0.42 \leq S1 < 0.85$	0.58	0.07
RIII	R3	$0.85 \leq S1 < 1.35$	1.11	0.07
RIV	R4	$1.35 \leq S1$	1.55	0.08

Figure 3 :

Système de classification R des revêtements routiers (extrait de [1]).

L'avantage du système de classification est de pouvoir caractériser les propriétés complètes de réflexion d'un revêtement par deux nombres : d'une part, son numéro de classe et, d'autre part, le coefficient moyen de luminance Q_0 . Les propriétés complètes de réflexion sont alors assimilées à la "matrice r " d'un revêtement représentant la classe (revêtement standard), éventuellement multipliée par le rapport entre Q_0 et le " Q_0 " du revêtement standard. Il faut alors être conscient que cette assimilation peut conduire à certains écarts significatifs entre le comportement réel du revêtement et celui du revêtement standard. Néanmoins, dans les cas pratiques de calculs d'installations d'Eclairage Public, le concepteur n'a pas toujours accès aux propriétés complètes de réflexion du revêtement choisi et le passage par la classification est souvent incontournable.

Mesure des "matrices r "

Cette mesure est effectuée en laboratoire. On prélève tout d'abord un échantillon du revêtement, par carottage. Le diamètre de l'échantillon est typiquement compris entre 20 et 25 cm. Dans une chambre noire, une source lumineuse placée à grande distance de l'échantillon crée un rayonnement orienté qui éclaire ce dernier. Le faisceau lumineux incident peut être collimaté pour éclairer toujours la même portion de l'échantillon, ou c'est le détecteur qui peut être conçu pour assurer cette fonction. Ce détecteur de rayonnement est en général fixe par rapport à l'échantillon et orienté à un angle $\alpha=1^\circ$. Il est du type "luminancemètre", avec un champ angulaire d'observation très réduit, ce qui est nécessaire pour des observations aussi rasantes.

Les valeurs de la "matrice r " sont déterminées en ajustant la direction d'incidence de la lumière par un système goniométrique, et en mesurant la luminance de l'échantillon. L'éclairement de l'échantillon est mesuré à l'aide d'un luxmètre pour une position de référence de la source. L'appareil complet s'appelle un gonioréfectomètre.

Nouvelles tendances

Lors de certaines applications, on a pris conscience au niveau international de l'insuffisance du système classique de représentation des propriétés photométriques des revêtements. Une première limitation réside dans la fixation de la direction d'observation. Lorsque l'on étudie par exemple l'influence de la réflexion du revêtement sur des cibles posées verticalement sur la chaussée (une situation connue sous le nom de "target visibility"), les directions de réflexion intéressantes ne sont pas les directions rasantes, d'où la caractérisation classique est incomplète. Il en va de même en éclairage des tunnels, lorsque l'on étudie l'influence de la route sur la luminance des murs et du plafond, ainsi que l'influence des murs sur la chaussée (en supposant que le système de classification photométrique s'applique également aux revêtements muraux).

Une seconde limitation réside dans l'insuffisance et l'inadéquation des paramètres permettant cette classification, ce qui conduit pour certains revêtements routiers à des erreurs significatives dans

les calculs d'éclairage, lorsqu'on les remplace par le revêtement standard de la classe. Enfin, une troisième limitation est l'absence actuelle d'un système de mesure fiable permettant de déterminer in-situ les propriétés photométriques des revêtements routiers.

De nouvelles recherches fondamentales menées à l'Université de Liège [2] ont permis de mettre au point un modèle mathématique de la réflexion lumineuse pour les calculs d'Eclairage. Développé initialement pour les problèmes d'éclairage intérieur, ce modèle a été confronté à la photométrie des revêtements routiers à l'occasion d'un projet de recherche mené en collaboration avec la société R-Tech et co-financé par la Région Wallonne.

Dans ce modèle, un revêtement routier est représenté concrètement par quatre paramètres :

- un paramètre de rugosité de surface;
- l'indice de réfraction équivalent;
- l'amplitude de la réflexion de surface (orientée);
- l'amplitude de la réflexion de volume (peu orientée, quasi-diffuse).

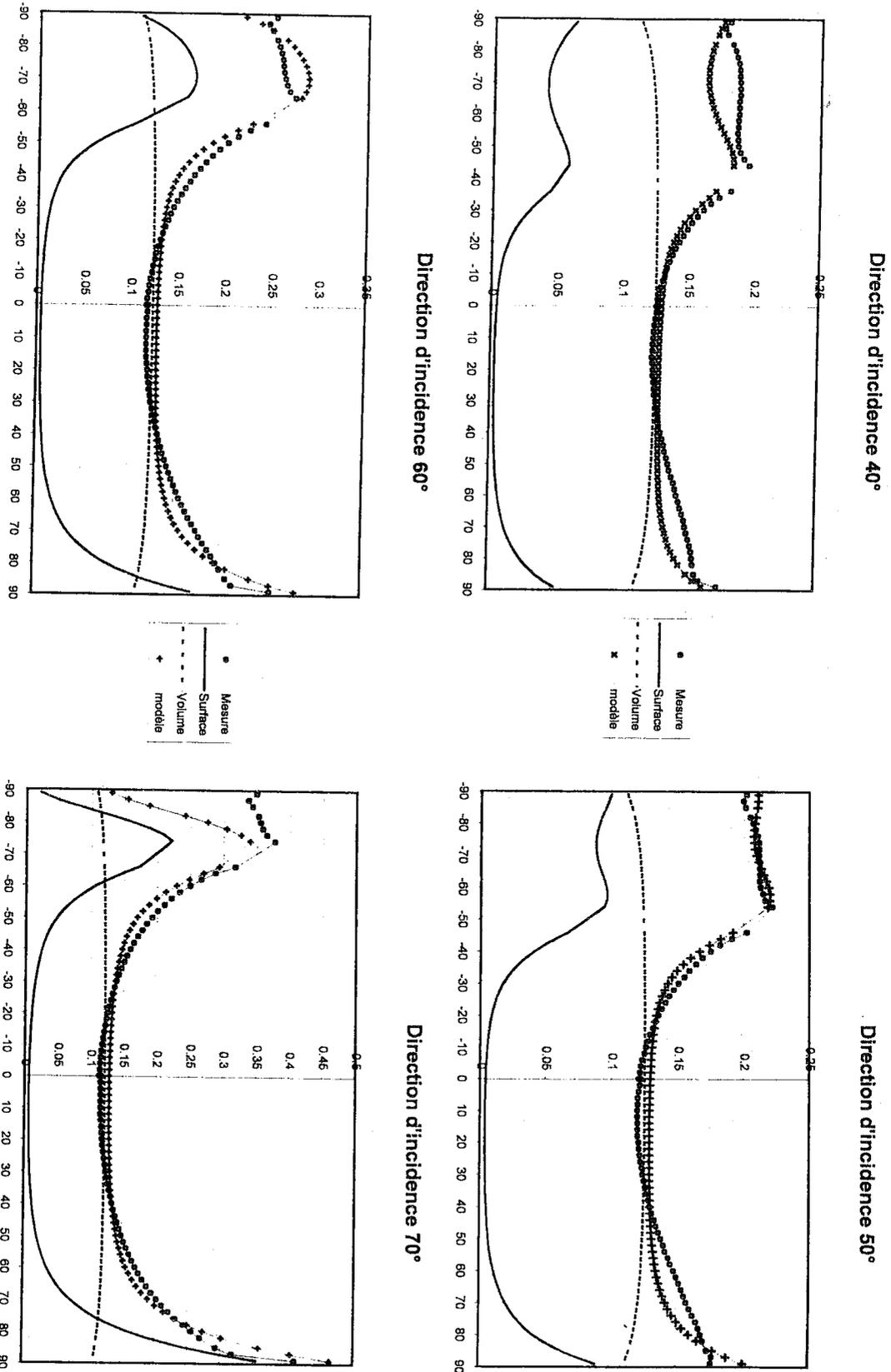
La recherche a consisté à obtenir tout d'abord des mesures goniorélectométriques aussi complètes que possible (α, β, γ variables) sur quelques échantillons de revêtement : deux en béton, un asphalte noir et deux enrobés drainants. Ces échantillons ont été mesurés au L.C.P.C. (Paris) qui, à l'heure actuelle, est l'un des rares organismes au monde à pouvoir réaliser cette mesure complète.

Une procédure a ensuite été mise au point pour déterminer, pour chaque échantillon, les valeurs des quatre paramètres qui permettaient la meilleure correspondance entre les résultats des mesures et le modèle mathématique. Tous ces échantillons avaient des surfaces très rugueuses (sauf l'asphalte qui l'est un peu moins), et donc le modèle mathématique était utilisé à la limite de son domaine de validité. Ce comportement limite a nécessité des corrections régulières du modèle, notamment au niveau de la fonction d'ombre et du renforcement de la réflexion "arrière" (backscattering).

Ce dernier phénomène est caractéristique des surfaces très rugueuses et est, semble-t-il, créé par les réflexions multiples de la lumière entre les éléments de la surface rugueuse. La fonction d'ombre, quant à elle, modélise les effets d'ombre créés par les éléments de surface les uns sur les autres. Quelques expressions de cette fonction proposées dans la littérature ont été testées.

Les résultats ont montré une bonne correspondance entre le modèle et les mesures (cfr.fig.4), sauf aux angles d'observation rasants où l'on n'a pu jusqu'à présent définir une modélisation adéquate fondée sur des raisonnements physiques. Les recherches continuent...

Figure 4 :
 Comparaison des facteurs de luminance mesurés et modélisés pour un échantillon de revêtement en
 béton dénudé



Au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.) de Paris, un équipement de mesure a été conçu pour mesurer la réflexion lumineuse des revêtements routiers selon quatre degrés de liberté (4 angles variables). En outre, des recherches sont menées sur l'étude fondamentale du processus de réflexion sur ce type de matériau. L'approche suivie est ici une approche de tir de rayons. Le but est d'acquérir une meilleure connaissance du comportement photométrique des revêtements routiers, afin de mettre au point une meilleure classification que la classification classique, et également d'analyser l'influence de certains phénomènes tels le vieillissement (diminution de rugosité) et le dépôt d'un film d'eau sur la chaussée par temps humide. Le L.C.P.C. est également en contact avec une équipe française travaillant sur la conception d'un goniorélectromètre pour mesures in-situ.

Dans le domaine des instruments de mesure, il faut également signaler la réalisation en cours d'un goniorélectromètre à 4 degrés de liberté par la société liégeoise R-Tech. Il est aussi fait mention dans la littérature d'un appareillage expérimental réalisé pour une thèse à l'Université de Waterloo, au Canada. Au Danemark, la société DELTA Light & Optics est intéressée par les mesures in-situ et travaille à la mise au point de prototypes pour les réaliser.

Le futur ...

De nouveaux types de revêtements sont régulièrement mis au point et utilisés sur nos routes. D'un point de vue photométrique, il est certain que la classification actuelle établie dans les années '70 sera rapidement obsolète. Le besoin urgent de nouvelles recherches visant à mettre à jour cette classification a été manifesté par des organismes tels la Commission Internationale de l'Eclairage et le Comité Européen de Normalisation.

Ceci a poussé plusieurs partenaires européens à s'associer dans un projet de recherche appelé PHAROS (PHotometric Analysis of ROad Surfaces), qui a été proposé pour financement à la Commission Européenne (décision toujours à venir). Les objectifs principaux de ce projet sont les suivants :

- la constitution d'une collection d'échantillons de revêtements routiers représentative de la situation européenne;
- la mesure goniorélectrométrique complète (en laboratoire) de ces échantillons et la constitution d'une base de données de résultats de mesure concernant la réflexion lumineuse sur les revêtements routiers;
- l'étude (par la modélisation) de l'influence des caractéristiques de surface des revêtements routiers sur leurs propriétés photométriques. Cette étude inclut notamment la comparaison des modèles et des mesures;

- l'élaboration d'un nouveau système de classification et la définition d'un prototype permettant les mesures in-situ des propriétés photométriques.

[1] "Road surfaces and lighting", Joint technical report CIE/PIARC, 1984.

[2] "Etude et modélisation de la réflexion lumineuse dans le cadre de l'Eclairage prévisionnel", Embrechts J.J., Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées n°146, Université de Liège, 1995.