

ÉCLAIRAGE EXTÉRIEUR

Contribution à la formation du halo lumineux dans le ciel nocturne

L'état des lieux sur la formation du halo lumineux est suivi d'une analyse scientifique de ce phénomène.

Le halo lumineux représente la zone lumineuse du ciel nocturne, étendue et diffuse, qui est visible dans la direction des villes, aéroports, complexes industriels, commerciaux et sportifs. Il résulte du rayonnement visible et invisible diffusé par les constituants de l'atmosphère (gaz, molécules, aérosols, particules polluantes) dans les directions d'observation.

On distingue les deux composantes du halo lumineux nocturne :

- Le halo naturel, dû au rayonnement des sources célestes et à la luminescence de l'atmosphère supérieure.
- Le halo artificiel dû au rayonnement artificiel des installations d'éclairage, lequel se compose :

- du rayonnement direct vers le ciel, des lampes et des luminaires ;
- du rayonnement dû à la lumière réfléchie par les surfaces éclairées et leurs abords.

C'est le halo artificiel qu'il y a lieu d'analyser, afin d'en mieux comprendre les mécanismes et d'optimiser les solutions qui permettent de réduire son importance.

Le développement tout à fait légitime et indispensable des installations d'éclairage ne doit pas rendre impossible la tâche des astronomes amateurs dans l'exercice de leur passion. Il n'y a aucune raison de priver l'homme moderne de pouvoir découvrir les richesses du ciel nocturne, telles que la ronde saisonnière des constellations, le ballet des planètes, la succession des phases lunaires, comme nous l'explique si bien Gilles Adams, astronome du centre de recherche astronomique de Lyon.

Il est indispensable de prendre en compte ce paramètre dans les nouvelles études d'éclairage.

État des lieux

Les publications n° 126 puis n° 150 (de 2003) de la Commission internationale de l'éclairage (CIE), faisant suite aux travaux des comités techniques T.C. 4.21 et T.C. 5.12, définissent par la relation suivante la contribution de l'éclairage au halo lumineux :

$$ULR = \frac{ULOR}{ULOR + DLOR}$$

ULR (*Upward Light Ratio*) représente le rapport du flux sortant des luminaires qui est émis dans l'hémisphère supérieur au flux total sortant des luminaires, lesquels étant dans leur position d'installation.

ULOR (*Upward Light Output Ratio*) est la proportion de flux des lampes de tous les luminaires considérés qui est émis au-dessus du plan horizontal passant par les luminaires dans leur position d'installation.

DLOR (*Downward Light Output Ratio*) est la proportion de flux des lampes de tous les luminaires considérés qui est émise en dessous du plan horizontal passant par les luminaires dans leur position d'installation.

On remarque que :

- ULR ne prend en compte que les luminaires, sans s'intéresser ni aux caractéristiques dimensionnelles de l'installation, ni aux propriétés photométriques des surfaces éclairées et en particulier à leurs caractéristiques de réflexion.
- Lorsque $ULOR = 0$, il n'y a aucun moyen d'apprécier les contributions relatives au halo lumineux des différentes solutions, contributions qui ne sont pas nulles pour autant.

Considérant que la connaissance de ULR est insuffisante pour connaître la participation d'une installation d'éclairage à la formation du halo lumineux et que les valeurs respectives de ULR de plusieurs solutions d'éclairage d'un même projet ne sont pas hiérarchiquement représentatives de la contribution à l'importance du halo (voir *Lux déc. 1998 et déc. 2000. Articles C. Remande*), nous prolongeons ici les études engagées précédemment dans les domaines de :

- l'éclairage public fonctionnel ;
- l'éclairage d'ambiance en milieu urbain ;
- l'éclairage des installations sportives et des grands espaces.

Évaluation du flux maximal potentiellement perdu UPF (UPward Flux)

De la même manière que dans les études précédemment citées, nous considérons que le flux lumineux alimentant le halo est constitué de trois apports de lumière tous dirigés dans l'hémisphère supérieur :

1. Le flux directement émis par les luminaires (ULOR).
2. Le flux réfléchi par la surface principale S (m^2) qui reçoit un éclairage de E (lux).
3. Le flux réfléchi par la surface des abords de la surface principale.

Si l'on désigne par :

- ρ_1 , le facteur de réflexion diffuse de la surface (S) à éclairer ;
- ρ_2 , le facteur de réflexion diffuse des abords ;

et si l'on prend en considération le facteur d'utilisation (u) de l'installation d'éclairage étudiée, on exprime le flux potentiellement perdu UPF par la relation :

$$UPF = F_{la} [ULOR + \rho_1 \cdot u + \rho_2 (DLOR - u)] \quad 1$$

dans laquelle F_{la} est le flux nominal de l'ensemble des lampes utilisées.

La méconnaissance des valeurs de ρ_1 et ρ_2 posait problème, mais cette interrogation a été levée puisqu'il existe maintenant des réflectomètres qui permettent de mesurer en laboratoire le facteur de réflexion diffuse de n'importe quel échantillon de revêtement, pour des angles de lumière incidente variant entre 0 et 180° et pour des angles d'observations variables.

Ainsi le LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées), équipé d'un tel appareil, a pu relever, pour les classes de chaussée de la CIE R1, R2, R3, le facteur de réflexion diffuse qui s'établit à :

- 0,16 pour R1
- 0,08 pour R2
- 0,095 pour R3

Il n'y a donc plus d'obstacle pour appliquer la formule 1 et apprécier l'influence relative de chaque paramètre dans l'expression du flux maximal potentiellement perdu.

Remarque : l'objectif n'est pas de s'intéresser à (UPF) en valeur absolue, mais :

- de comparer les différents (UPF) de plusieurs solutions d'un même projet afin de sélectionner celle qui diffuse le minimum de lumière vers le ciel ;
- d'apprécier la valeur de UPF par rapport à sa valeur minimale théorique UPF_{mini} .

C'est pourquoi nous avons tenu à appeler le flux perdu dans l'hémisphère supérieur "*flux maximal potentiellement perdu dans l'hémisphère supérieur*".

Il est "maximal" parce que l'on ne prend pas en compte la partie du flux qui serait absorbée totalement ou partiellement par des obstacles tels que des frondaisons, des bâtiments, des dénivelés, etc.

Il est "potentiellement" perdu et pas forcément "réellement" perdu, car tout ou partie de ce flux peut être volontairement affecté, en milieu urbain, à la mise en valeur de l'environnement de la surface principale éclairée. De même, il n'est pas forcément gênant lorsque le milieu atmosphérique est dégagé et non pollué.

Formulation du flux perdu UPF

L'éclairement moyen E (en lux) reçu par une surface S (en m^2) à la mise en service d'une installation d'éclairage, s'exprime en fonction du flux lumineux F_{la} (en lumens) des lampes et du facteur d'utilisation u de l'installation d'éclairage, sous la forme :

$$E = \frac{u \cdot F_{la}}{S}$$

L'éclairement E est défini à partir de l'éclairement requis E' exigé par le cahier des charges.

E' représente l'éclairement moyen à maintenir (voir chapitre 12 des Recommandations AFE relatives à l'éclairage des voies publiques) et du facteur de maintenance M de l'installation, suivant la relation :

$$E = \frac{E'}{M}$$

D'autre part, lorsqu'un éclairage requis est signifié, le choix des lampes et les paramètres de l'installation ne permettent que rarement d'obtenir la valeur exacte E'.

On obtient généralement à la mise en service

$$E = \frac{E''}{M}$$

avec $E'' \geq E'$. Par souci de simplification dans les calculs qui suivent, on ne s'intéressera qu'à la valeur E définie comme l'éclairement réel à la mise en service, pour évaluer le flux maximal potentiellement perdu UPF.

On peut alors écrire :

$$UPF = \frac{E.S}{u} \cdot \left[ULOR + \rho_1 \cdot u + \rho_2 \cdot \left(\frac{DLOR - u}{u} \right) \right]$$

$$UPF = E.S \cdot \left[\frac{ULOR}{u} + \rho_1 + \rho_2 \cdot \left(\frac{DLOR - u}{u} \right) \right] \quad \mathbf{2}$$

Lorsque $ULOR = 0$ et dans le cas théorique où tout le flux émis serait contenu dans la surface S ($DLOR = u$), on aurait alors la valeur minimale irréductible de UPF à savoir :

$$UPF_{min} = \rho_1 \cdot E.S \quad \mathbf{3}$$

Nous avons considéré qu'il était intéressant d'exprimer le rapport

$$\frac{UPF}{UPF_{min}}$$

qui représente le niveau de nuisance. Nous avons désigné ce rapport par UFR (Upward Flux Ratio).

Il résulte des équations **2** et **3** :

$$UFR = 1 + \frac{ULOR}{\rho_1 \cdot u} + \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \left(\frac{DLOR - u}{u} \right)$$

La valeur minimale théorique de UFR est 1 lorsque $ULOR = 0$ et que $DLOR = u$

On en déduit la valeur de UPF en proportion du produit E.S ou de F_{la}

$$UPF = UFR \cdot \rho_1 \cdot E.S$$

$$\frac{UPF}{E.S} = \rho_1 \cdot UFR \quad \mathbf{4}$$

$$\frac{UPF}{F_{la}} = \rho_1 \cdot u \cdot UFR \quad \mathbf{5}$$

Les équations **4** et **5** sont directement calculables par le programme informatique développé pour cette étude.

Elles sont toutes les deux intéressantes à des titres divers.

L'équation **4** exprime UPF en proportion du produit E.S., c'est-à-dire des valeurs imposées par le maître d'ouvrage, lequel peut ainsi apprécier le coût en "nuisances" du choix de E et de S.

Dans cette équation, il ne faut pas retrancher de la valeur trouvée pour UPF, la valeur de ULOR, en pensant évaluer par soustraction la valeur du flux réfléchi, car les deux termes ne sont pas exprimés pour une valeur commune de F_{la} .

La formule **5** exprime UPF en proportion de F_{la} , cette formule permet d'apprécier l'importance relative du flux directement émis par les luminaires vers le ciel (ULOR) et de l'ensemble du flux réfléchi par la surface (S) et ses abords.

Applications

Nous calculons, à partir des équations **4** et **5**, les niveaux de nuisance UFR d'installations caractéristiques de l'éclairage extérieur et représentatives de la majorité des cas rencontrés dans les domaines de :

- l'éclairage public fonctionnel (autoroutes, routes, voiries urbaines, etc.) ;

- l'éclairage public d'ambiance (voies piétonnes, promenades, parcs, etc.) ;
- l'éclairage par projecteurs (grands espaces routiers, sportifs, commerciaux).

I. Éclairage public fonctionnel

• **Facteur de réflexion diffuse de la surface éclairée** : $0,08 \leq \rho_1 \leq 0,16$, allant de l'enrobé R2 peu spéculaire au béton clair.

• **Facteur de réflexion diffuse équivalent des abords** : $0,05 \leq \rho_2 \leq 0,15$, allant de la terre battue au béton sale en passant par la pelouse.

• **Facteur d'utilisation** : $0,03 \leq u \leq 0,45$, allant d'installations anciennes utilisant des lampes à vapeur de mercure à ballon fluorescent, aux installations modernes routières et autoroutières utilisant des lampes à vapeur de sodium haute pression tubulaires.

• **ULOR** : en éclairage public fonctionnel, tous les luminaires performants fermés sont caractérisés par des valeurs de ULOR telles que : $0\% \leq ULOR \leq 3\%$.

Ces écarts sont généralement dus aux caractéristiques des vasques de fermeture.

• **DLOR** : en éclairage public fonctionnel, le rendement des luminaires étant de l'ordre de 75 %, nous avons considéré que, compte tenu des valeurs de ULOR et de l'écart entre les performances des luminaires, DLOR pouvait évoluer dans les limites suivantes : $67\% \leq DLOR \leq 81\%$.

Le fait d'adapter DLOR à la valeur choisie pour ULOR, justifie l'existence dans les *tableaux I et II* des trois colonnes de résultats.

De toute évidence, ces tableaux représentent la synthèse de l'ensemble des cas rencontrés en éclairage public fonctionnel, mais le programme de calcul permet de traiter tous les cas possibles en affectant des valeurs particulières aux sept paramètres considérés.

potentiellement perdu varie dans le rapport de 1 à 2,25 en fonction des différentes valeurs aux limites données à ρ_1 et ρ_2 et ce pour chaque valeur donnée à ULOR.

– Lorsque ULOR varie entre 0 et 3 % dans les plages choisies pour DLOR et u, le flux maximal potentiellement perdu varie entre 12 % et 50 % de E.S lorsque les valeurs données aux facteurs de réflexion ρ_1 et ρ_2 passent des valeurs minimales choisies aux valeurs maximales, ainsi UPF varie dans le rapport de 1 à 4 en fonction des valeurs des sept paramètres concernés.

• Tableau II

– Ce tableau exprime le pourcentage de Fla qui caractérise le flux perdu. Il a pour seul intérêt de montrer la relation entre le flux direct et le flux maximal potentiel perdu dans l'hémisphère supérieur, au cas par cas. Il ne permet pas de comparer entre eux les différents pourcentages proposés, car chacune de ces valeurs est associée à une valeur particulière de F_{la} , laquelle est inversement proportionnelle au facteur d'utilisation correspondant.

– Lorsque $ULOR = 0$, le flux réfléchi dans l'hémisphère supérieur peut représenter jusqu'à 13 % du flux des lampes correspondant. Ce tableau ne permet pas de démontrer l'influence du facteur d'utilisation de l'installation, mais si l'on se rapporte à la formule du flux maximal potentiel perdu **1**, on voit que le rapport $\frac{ULOR}{u}$ est d'autant plus

petit que u est grand, de même

$$\left(\frac{DLOR - u}{u} \right) \text{ qui s'écrit aussi } \left(\frac{DLOR}{u} - 1 \right)$$

sera minimum pour le plus petit rapport $\frac{DLOR}{u}$

Tableau I

UPF EXPRIMÉ EN % DU PRODUIT E.S				
Eclairage public fonctionnel		$0,7 \leq DLOR \leq 0,81$ $0,30 \leq u \leq 0,45$	$0,69 \leq DLOR \leq 0,80$ $0,30 \leq u \leq 0,45$	$0,67 \leq DLOR \leq 0,78$ $0,30 \leq u \leq 0,45$
ρ_1	ρ_2	ULOR = 0 %	ULOR = 1 %	ULOR = 3 %
8 %	5 %	12 à 17	14 à 20	18 à 26
	15 %	20 à 33	22 à 36	26 à 42
16 %	5 %	20 à 24	22 à 27	26 à 34
	15 %	27 à 42	29 à 45	34 à 50

Tableau II

UPF EXPRIMÉ EN % DU FLUX TOTAL DES LAMPES F_{la}				
Eclairage public fonctionnel		$0,7 \leq DLOR \leq 0,81$ $0,30 \leq u \leq 0,45$	$0,69 \leq DLOR \leq 0,80$ $0,30 \leq u \leq 0,45$	$0,67 \leq DLOR \leq 0,78$ $0,30 \leq u \leq 0,45$
ρ_1	ρ_2	ULOR = 0 %	ULOR = 1 %	ULOR = 3 %
8 %	5 %	4 à 5	5 à 6	7 à 8
	15 %	8 à 9	9 à 11	10 à 13
16 %	5 %	7 à 9	8 à 10	10 à 12
	15 %	11 à 13	12 à 13	13 à 15

Résultats

Les *tableaux I et II* expriment UPF en fonction des facteurs de réflexion choisis et des différentes valeurs de ULOR 0 % - 1 % - 3 %, le pourcentage du produit E.S et le pourcentage du flux lampe Fla pour des valeurs compatibles de DLOR et de u.

• Tableau I.

– Pour une valeur constante du produit E.S dans les plages choisies pour DLOR, ULOR et u, la plage de flux maximal

Cela montre clairement que, dans toute installation, il y a intérêt à avoir le facteur d'utilisation le plus élevé possible et simultanément le plus petit rapport $\frac{DLOR}{u}$.

Ce résultat conforte les recherches faites par les constructeurs éclairagistes qui, en permanence, recherchent les photométries les plus efficaces conduisant simultanément à des économies de coût, d'énergie et de nuisances dues à la lumière.

Tableau III

UPF EXPRIMÉ EN % DU PRODUIT E.S					
Eclairage d'ambiance		0,3 ≤ DLOR ≤ 0,6 0,15 ≤ u ≤ 0,30		0,3 ≤ DLOR ≤ 0,5	DLOR = 0,30 u = 0,15
ρ ₁	ρ ₂	ULOR = 5 %	ULOR = 10 %	ULOR = 15 %	ULOR = 30 %
8 %	5 %	30 à 50	45 à 80	61 à 113	210 à 230
	15 %	40 à 66	51 à 90	68 à 123	
16 %	5 %	38 à 66	53 à 88	69 à 121	
	15 %	48 à 74	59 à 98	77 à 131	

Tableau IV

UPF EXPRIMÉ EN % DU PRODUIT F _{la}					
Eclairage d'ambiance		0,3 ≤ DLOR ≤ 0,6 0,15 ≤ u ≤ 0,30		0,3 ≤ DLOR ≤ 0,5	DLOR = 0,30 u = 0,15
ρ ₁	ρ ₂	ULOR = 5 %	ULOR = 10 %	ULOR = 15 %	ULOR = 30 %
8 %	5 %	7 à 9	12 à 14	17 à 18	32 à 35
	15 %	8 à 12	13 à 17	18 à 22	
16 %	5 %	8 à 11	13 à 16	18 à 21	
	15 %	10 à 14	15 à 19	20 à 24	

II. Éclairage d'ambiance urbaine

Le même travail que pour l'éclairage fonctionnel a été réalisé, mais en adaptant la valeur des paramètres aux caractéristiques des luminaires utilisés dans ce type d'éclairage.

• **Facteurs de réflexion diffuse de la surface éclairée et de ses abords.** Nous considérons les mêmes valeurs de ρ₁ et ρ₂ que pour l'éclairage fonctionnel.

• **Facteur d'utilisation :** 0,15 ≤ u ≤ 0,30, allant du diffuseur intégral sans optique au luminaire moderne équipé d'une optique performante pour ce type d'éclairage, mais n'utilisant pas les caractéristiques des optiques éclairage public fonctionnel, lesquelles doivent être classées dans la catégorie luminaires fonctionnels. Les facteurs d'utilisation sont plus faibles que précédemment, compte tenu des répartitions plus dispersives du flux lumineux de ces luminaires.

• **ULOR :** en éclairage d'ambiance, les luminaires, pour des raisons de qualité d'ambiance, de diffusion de la lumière et d'aspect sécurisant, ne doivent pas rabattre toute la lumière sur la seule surface à éclairer et doivent avoir une certaine brillance perceptible, sans pour autant éblouir. Pour cela, malheureusement, la valeur de ULOR augmente et peut atteindre des valeurs critiques voire condamnables (boules diffusantes). Nous avons considéré les cas limites suivants : 0,05 ≤ ULOR ≤ 0,30, sachant que bon nombre de luminaires actuels ont des valeurs de ULOR voisines de 0,10.

• **DLOR :** en éclairage d'ambiance, ces valeurs sont très différentes suivant les matériels, lesquels sont soumis à des considérations esthétiques plus ou moins contraignantes. Les luminaires d'ambiance urbaine produisent des éclairagements verticaux plus élevés favorisant une meilleure perception des obstacles urbains sur un fond éclairé. Nous avons considéré : 0,3 ≤ DLOR ≤ 0,6

Les tableaux III et IV expriment les valeurs de UPF en fonction des facteurs de réflexion choisis et des différentes valeurs de ULOR, DLOR et u compatibles entre elles.

Résultats

• Tableau III

En se limitant aux luminaires ayant une valeur de ULOR ≤ 15 %, représentative de la majorité des luminaires performants, on

constate que le flux perdu global UPF exprimé en pourcentage du produit constant E.S évolue entre 30 % et 131 % de E.S, c'est-à-dire dans le rapport de 1 à 4. Dans le cas des diffuseurs intégraux, le flux perdu dans l'hémisphère supérieur représente jusqu'à 230 % du produit E.S, et, dans ce cas (E.S = 0,15 F_{la}), le flux maximal potentiellement perdu dans l'hémisphère supérieur représente 34,5 % du flux nominal des lampes, ce qui est considérable.

Dans ce cas extrême, ULOR représente à lui seul 30 % du flux des lampes et le flux réfléchi par les surfaces éclairées n'est plus significatif, quels que soient les facteurs de réflexion de ces surfaces.

• Tableau IV

UPF est exprimé en pourcentage de F_{la}. Ce tableau ne sert qu'à comparer les proportions de flux directs et totaux dirigés dans l'hémisphère supérieur, solution par solution, sans comparaison possible entre les solutions.

III. Éclairage par projecteurs des installations sportives et des grands espaces extérieurs

Là encore, un travail similaire aux deux précédents a été réalisé, en adaptant la valeur des paramètres aux caractéristiques des luminaires utilisés dans ce type d'éclairage.

Tableau V

UPF EXPRIMÉ EN % DU PRODUIT E.S					
Eclairage par projecteurs		DLOR = 0,72 0,35 ≤ u ≤ 0,45	DLOR = 0,75 0,35 ≤ u ≤ 0,4	DLOR = 0,70 0,30 ≤ u ≤ 0,35	DLOR = 0,65 0,25 ≤ u ≤ 0,30
ρ ₁	ρ ₂	ULOR = 0 %	ULOR = 5 %	ULOR = 10 %	ULOR = 15 %
4 %	5 %	7 à 9	21 à 24	38 à 44	60 à 72
	15 %	13 à 20	30 à 35	48 à 57	72 à 88
24 %	5 %	27 à 30	41 à 44	58 à 64	80 à 92
	15 %	33 à 40	50 à 55	68 à 77	92 à 108

Tableau VI

UPF EXPRIMÉ EN % DU PRODUIT F _{LA}					
Eclairage par projecteurs		DLOR = 0,72 0,35 ≤ u ≤ 0,45	DLOR = 0,75 0,35 ≤ u ≤ 0,45	DLOR = 0,70 0,30 ≤ u ≤ 0,35	DLOR = 0,65 0,25 ≤ u ≤ 0,30
ρ ₁	ρ ₂	ULOR = 0 %	ULOR = 5 %	ULOR = 10 %	ULOR = 15 %
4 %	5 %	3	8	13	18
	15 %	6 à 7	12	17	22
24 %	5 %	10 à 12	16	20	24
	15 %	14 à 15	20	23	27

• **Facteur de réflexion diffuse de la surface éclairée :** 0,04 ≤ ρ₁ ≤ 0,24, allant de la cendrée au béton ou autres surfaces claires (peintes ou synthétiques).

• **Facteur de réflexion diffuse équivalent des abords :** 0,05 ≤ ρ₂ ≤ 0,15, allant de la terre battue au béton sale en passant par la pelouse.

• **Facteur d'utilisation :** 0,25 ≤ u ≤ 0,45, allant des projecteurs utilisant des réflecteurs cylindro-paraboliques symétriques aux réflecteurs asymétriques ou de révolution ou encore symétriques utilisant des déflecteurs ou des dispositifs de défilement. L'inclinaison des projecteurs détermine la valeur du facteur d'utilisation en même temps que ULOR et DLOR pour les luminaires installés. C'est une caractéristique actuellement typique de ce type d'éclairage.

• **ULOR :** les projecteurs performants d'éclairage extérieur d'installations sportives sont étudiés pour limiter les intensités lumineuses au-dessus de l'axe optique. Ils sont caractérisés par des valeurs de ULOR telles que : 0 % ≤ ULOR ≤ 3 %

Les distributions lumineuses moins défilées, voire non défilées, des projecteurs symétriques conduisent à une fourchette de valeurs également liée à leur inclinaison : 5 % ≤ ULOR ≤ 15 %

• **DLOR :** le rendement des projecteurs étant de l'ordre de 75 %, nous avons considéré que, compte tenu des valeurs de ULOR et de l'inclinaison qui est souvent déterminante, DLOR pouvait évoluer dans les limites suivantes : 65 % ≤ DLOR ≤ 75 %

Ces tableaux représentent la synthèse des combinaisons rencontrées dans une installation, mais le programme de calcul permet de traiter chaque cas particulier, en affectant des valeurs adéquates aux sept paramètres considérés.

Résultats

• Tableau V

La première colonne du tableau correspond aux luminaires performants pour lesquels ULOR est inférieur à 3 %. Cette limitation est liée à une distribution lumineuse volontairement défilée au-dessus de l'axe optique des projecteurs, garante de la limitation de l'éblouissement sur l'aire sportive, mais aus-

si d'une limitation de la lumière indésirable, au-delà des limites d'emprise horizontale de l'installation. Les résultats sont alors comparables à ceux des installations d'éclairage public fonctionnel.

En revanche, les autres colonnes du tableau montrent une gradation croissante de la lumière indésirable avec ULOR en relation avec l'inclinaison de projecteurs "symétriques". Toutefois, ces résultats restent globalement inférieurs en contribution au halo lumineux à ceux obtenus avec des luminaires d'ambiance urbaine.

• Tableau VI

Comme pour les autres types d'éclairage, ce tableau exprime le pourcentage de F_{la} qui caractérise le flux perdu. Il a pour seul intérêt de montrer la relation entre le flux direct et le flux maximal potentiellement perdu dans l'hémisphère supérieur, cas par cas. Il ne permet pas de comparer entre eux les différents pourcentages proposés, car chacune de ces valeurs est associée à une valeur particulière de F_{la} , laquelle est inversement proportionnelle au facteur d'utilisation correspondant.

Lorsque ULOR = 0, le flux réfléchi dans l'hémisphère supérieur peut représenter jusqu'à 15 % du flux des lampes correspondant.

Conclusions communes aux trois types d'éclairage

De ces études d'éclairage public fonctionnel, d'éclairage d'ambiance et enfin d'éclairage des grands espaces à l'aide de projecteurs, on retiendra :

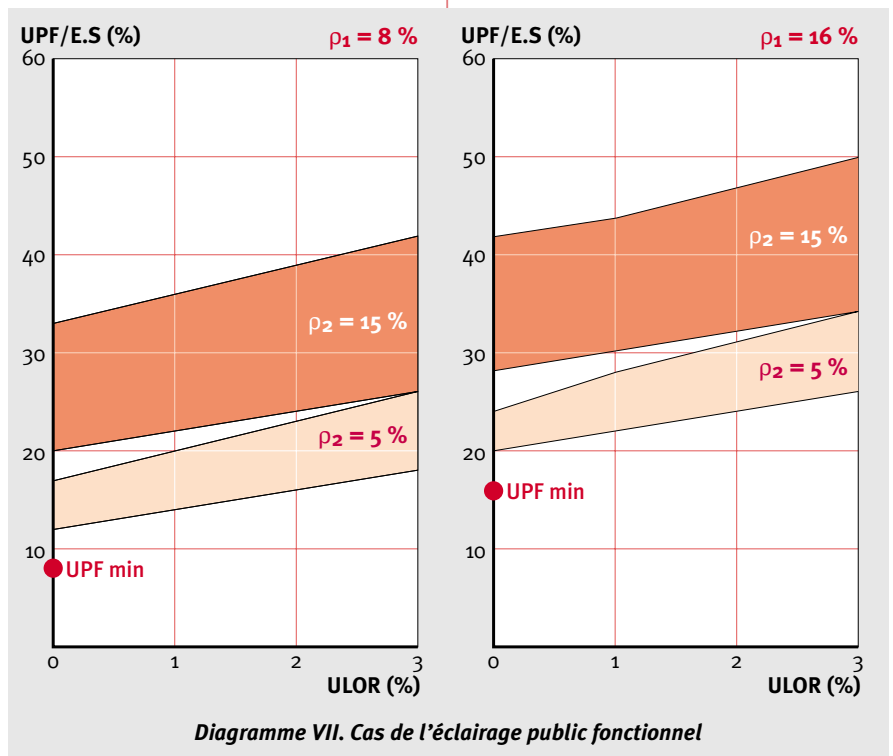
1. que le critère ULR proposé par la CIE n'est pas significatif pour classer les meilleures solutions lorsque ULR est faible ou nul, c'est-à-dire lorsque ULOR est voisin de 0, ce qui est le cas des installations d'éclairage public fonctionnel et de certaines installations d'éclairage "sportif" ou de grands espaces utilisant des projecteurs défilés ou peu, voire pas, inclinés ;
2. que ce critère ULR est significatif pour les valeurs élevées de ULOR, valeurs que nous estimons égales ou supérieures à 5 % pour les revêtements à faible facteur de réflexion et à 10 % et plus pour les revêtements dont le facteur de réflexion est élevé ;
3. qu'il est en conséquence souhaitable de retenir les équations proposées dans cet exposé pour apprécier les meilleures solutions d'un projet.

Tableau VIII. Valeurs de UFR

E/Er	ρ_1	ρ_2	ULOR	DLOR	u	ULOR/u	DLOR/u	UFR
1.00	0.24	0.05	0.05	0.50	0.25	0.20	2.00	2.04
1.00	0.04	0.30	0.05	0.50	0.25	0.20	2.00	13.50
$\rho_1 \backslash \rho_2$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30		
0.04	7.3	8.5	9.8	11.0	12.3	13.5		
0.08	4.1	4.8	5.4	6.0	6.6	7.3		
0.12	3.1	3.5	3.9	4.3	4.8	5.2		
0.16	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1		
0.20	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5		
0.24	2.0	2.3	2.5	2.7	2.9	3.1		

Tableau IX. Valeurs de UFR

E/Er	ρ_1	ρ_2	ULOR	DLOR	u	ULOR/u	DLOR/u	UFR
1.00	0.24	0.05	0.03	0.67	0.35	0.09	1.91	1.55
1.00	0.04	0.30	0.03	0.67	0.35	0.09	1.91	10.00
$\rho_1 \backslash \rho_2$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30		
0.04	4.3	5.4	6.6	7.7	8.9	10.0		
0.08	2.6	3.2	3.8	4.4	4.9	5.5		
0.12	2.1	2.5	2.9	3.2	3.6	4.0		
0.16	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3		
0.20	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	2.8		
0.24	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5		



Le ratio $UFR = \frac{UPF}{UPF_{min}}$ facile à calculer, permet d'apprécier rapidement les solutions les plus performantes. L'idéal étant que ce rapport, toujours supérieur à 1, prenne des valeurs les plus voisines de l'unité.

Représentation graphique

A titre d'exemple, dans le cas de l'éclairage public fonctionnel, nous avons tracé le diagramme VII, correspondant au tableau I. Il exprime le flux maximal potentiellement perdu, en pourcentage du produit éclairage surface, E.S, pour tous les paramètres considérés.

Les plages de couleur crème représentent les flux perdus lorsque $\rho_2 = 5\%$. Les plages de couleur orange concernent les flux perdus lorsque $\rho_2 = 15\%$.

On peut ainsi lire sur le graphique l'importance relative du flux maximal dirigé dans l'hémisphère supérieur, pour les différentes situations analysées. Les meilleures solutions étant celles qui se situent le plus bas possible dans les plages considérées.

Sur le graphique, les deux points rouges représentent les valeurs minimales irréductibles du flux dirigé dans l'hémisphère supérieur.

Exemple d'application à l'éclairage d'ambiance

Eclairage d'ambiance d'une voie piétonne

- Longueur : 200 m.
- Largeur de voie : 5,80 m.
- Implantation axiale ; espacement : 20 m ; hauteur de feu : 4,50 m.
- Eclairage requis : 10 lux.
- Luminaires d'ambiance – lampes halogènes métalliques ; 70 W ; 6 300 lumens.
- Facteur d'utilisation : 0,25.
- Facteur de réflexion de la voie : 16 % (béton).
- Facteur de réflexion des abords : 5 % (enrobé noir).
- Facteur de maintenance : 0,8.
- ULOR = 5 %.
- DLOR = 50 %.
- Nombre de luminaires : N = 10.

A partir des valeurs de ULOR, DLOR et u, le programme de calcul fournit toutes les valeurs prises par le ratio UFR en fonction des valeurs de ρ_1 et ρ_2 .

L'éclairage à la mise en service

$$E = \frac{F_{la} \cdot N \cdot u}{S} = \frac{6300 \times 10 \times 0,25}{1160} = 13,6 \text{ lux}$$

$$UPF_{min} = 0,16 \times 13,6 \times 1160 = 2524 \text{ lumens}$$

Tableau X. Valeurs de UFR

E/Er	ρ_1	ρ_2	ULOR	DLOR	u	ULOR/u	DLOR/u	UFR
1.00	0.24	0.05	0.30	0.30	0.15	2.00	2.00	9.54
1.00	0.04	0.30	0.30	0.30	0.15	2.00	2.00	58.50
ρ_1	ρ_2	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	
0.04		52.3	53.5	54.8	56.0	57.3	58.5	
0.08		26.6	27.3	27.9	28.5	29.1	29.8	
0.12		18.1	18.5	18.9	19.3	19.8	20.2	
0.16		13.8	14.1	14.4	14.8	15.1	15.4	
0.20		11.3	11.5	11.8	12.0	12.3	12.5	
0.24		9.5						
0.25								
0.26		9.8	10.0	10.2	10.4	10.6		

Pour $\rho_1 = 16\%$ et $\rho_2 = 5\%$, on lit sur le tableau VIII : UFR = 2,6. On en déduit : $UPF = 2,6 \times 2\,524 = 6\,563$ lumens, soit **10,4 % du flux nominal total des lampes.**

Pour améliorer ce résultat, il faudrait envisager des optiques de type éclairage public, ce qui permettrait d'obtenir au mieux une valeur de UFR de 1,8 (tableau IX). Mais il faudrait des espacements entre luminaires de 4 fois la hauteur de feu, ce qui conduirait ici à utiliser 11 luminaires produisant un éclairage moyen à la mise en service de 18 lux (valeur trop élevée). Ces nouvelles caractéristiques donneraient $UPF_{min} = 3\,340$ lumens et : $UPF = 1,8 \times 3\,340 = 6\,012$ lumens, valeur très voisine du résultat précédent. Seule une variation de puissance permettrait de ramener l'éclairage moyen à 12,5 lux et UPF à 4 175 lm. Le coût global serait plus élevé et l'ambiance lumineuse serait probablement dégradée (diminution de l'éclairage vertical, de l'éclairage des abords et suppression de l'aspect agréable dû à la luminosité apparente des luminaires).

En revanche, une installation réalisée avec des diffuseurs genre "boule opale" conduirait aux résultats suivants :

$$\text{Nombre de luminaires} = \frac{12,5 \times 1160}{6300 \times 0,15} = 15,3,$$

soit 16 luminaires.

$$\text{Eclairage moyen à la mise en service : } \frac{16 \times 6\,300 \times 0,15}{1\,160} = 13 \text{ lux}$$

$$\text{Flux total } F_{la} = 16 \times 6\,300 = 100\,800 \text{ lumens.}$$

La sortie informatique correspondante donne : UFR = 13,8 (tableau X). Sachant que $UPF_{min} = 0,16 \times 13 \times 1\,160 = 2\,413$ lumens, on en déduit $UPF = 13,8 \times 2\,413 = 33\,299$ lumens.

Cette dernière valeur représente 33 % du flux total des lampes, soit 5 fois plus de flux perdu dans l'hémisphère supérieur que dans la première solution, sans oublier une consommation électrique de 60 % supérieure, pour un même éclairage sur la chaussée.

Ces exemples mettent en évidence l'intérêt pour le maître d'ouvrage :

1. de n'imposer que la seule lumière nécessaire et suffisante à la tâche visuelle à accomplir ;
2. d'en exiger la valeur tout au long de la durée de vie de l'installation (éclairage requis à maintenir) ;
3. de demander aux éclairagistes consultés les justificatifs concernant l'optimisation des paramètres photométriques qu'ils ont choisis ou calculés (ULOR - DLOR - u - UPF - UFR).

Tableau XI. Exigence UFR_{max} en fonction de ρ_1 (surface de référence) et de ρ_2 (abords)

ρ_1	ρ_2	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.05		4	5,3	6,4	7,6	8,8	10,1
0.1		2,5	3,1	3,8	4,3	4,9	5,5
0.15		2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
0.2		1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3
0.25		1,6	1,9	2,1	2,4	2,6	2,8
0.3		1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5

Cas de l'éclairage des grands espaces

Jusqu'à présent, l'expérience a montré que l'utilisation de projecteurs nécessite généralement de prévoir leur inclinaison pour optimiser l'obtention des critères classiques de niveau d'éclairage et d'uniformité. Le seul compromis qui s'oppose à une inclinaison excessive des projecteurs est la limitation de l'éblouissement par le biais du calcul de GR (Glare Rating : voir les Recommandations AFE relatives à l'éclairage des voies publiques, § 9.16). La limitation de la contribution au halo lumineux nocturne se présente aujourd'hui comme un critère complémentaire : une condition nécessaire mais non suffisante, comme nous le verrons en conclusion.

Il existe à la Commission internationale de l'éclairage un comité technique, TC 5.20, dont les travaux actuels concernent l'éclairage des installations sportives. La France participe de façon active à ce comité qui permettra d'introduire la prise en compte de la lumière indésirable précisément pour en réduire les effets. Nous avons proposé la rédaction du chapitre "Obtrusive Light" pour la future publication. Il s'agit d'un plus par rapport à la norme européenne EN 12193 traitant de l'éclairage des installations sportives puisque le futur document inclura cette notion de contribution de la lumière au halo lumineux nocturne en proposant une méthode de limitation du flux maximal potentiellement perdu qui fixe des valeurs maximales de UFR. C'est en effet ce dernier paramètre qui permet de bien dissocier la part de lumière indésirable qui incombe à la distribution lumineuse des luminaires de celle qui provient des caractéristiques de réflexion des surfaces éclairées. C'est donc un outil de projet assez commode pour le cas de l'éclairage obtenu par des projecteurs dont l'inclinaison joue un rôle photométrique déterminant.

Le tableau suivant donne l'exemple que nous avons proposé pour les valeurs de UFR_{max} (tableau XI).

Ce tableau a été obtenu en choisissant pour les installations sportives les paramètres suivants :

$$E/Er = 1,05 \quad ULOR = 0,03 \quad DLOR = 0,75 \quad u = 0,35$$

qui correspondent donc à une installation fonctionnelle basique, dans laquelle est introduite la valeur E / Er. Cette dernière permet d'inclure une marge d'adaptation du projet par rapport à l'exigence requise dans

la relation $E'' > E'$ mentionnée au début de cet article.

Dans le dimensionnement de l'installation, on fixe donc les valeurs de facteurs de réflexion diffuse déterminées *in situ* ou choisies par le maître d'ouvrage. Il résulte du tableau XI une valeur unique UFR_{max} qui permettra d'optimiser le projet à l'aide de distributions lumineuses "concurrentielles", compatibles avec les paramètres retenus, et par conséquent comparatives en termes de contribution au halo lumineux.

Conclusion

Cet article constitue une information sur le point de vue des éclairagistes dans le travail de la commission AFE traitant des "nuisances lumineuses". Mais le halo lumineux nocturne n'est pas la seule nuisance due à la lumière indésirable d'une installation d'éclairage. En même temps que nous avons proposé au TC 520 de la CIE, cité précédemment, une alternative au facteur ULR, nous avons également proposé une approche pragmatique pour l'évaluation de la lumière émise dans l'hémisphère inférieur en dehors de la surface utile. Il s'agit, d'après la publication CIE n° 150, de respecter aussi des éclairages verticaux limités sur les façades, des intensités lumineuses limitées, elles aussi, dans des directions précisées et également des valeurs d'éblouissement d'incapacité, prônées par le biais du TI (Threshold Increment) pour les usagers routiers soumis à l'éclairage parasite d'une installation sportive, en l'occurrence. Notre approche combine ces différents paramètres par le calcul de la **luminance de voile** que perçoivent les riverains de l'installation qui sont placés systématiquement sur des cercles concentriques à distance et hauteur variables, mais définies, de l'aire de jeu.

Il est clair, en effet, que la limitation de la contribution au halo lumineux est une condition nécessaire à la limitation de la lumière indésirable. Elle n'est pas suffisante pour les installations fonctionnelles, celles utilisant des projecteurs en particulier, si elle n'est pas complétée par le souci de réduire la lumière qui s'étend, dans l'hémisphère inférieur, au-delà des limites des surfaces volontairement éclairées. ■

CHRISTIAN REMANDE
PRÉSIDENT DU GROUPE DE TRAVAIL
"NUISANCES LUMINEUSES" ET EXPERT AFE

JACQUES LECOCQ
DIRECTEUR DE LA DIVISION V DU CNFE
R & D ÉCLAIRAGISME (THORN)