Vers un contrôle efficace de la pollution lumineuse :

l'optimisation de l'éclairage public à partir d'une modélisation précise de la pollution lumineuse

Nicolas Bessolaz *

LICORNESS

Les bases physiques de la modélisation de la pollution lumineuse

La modélisation de la pollution lumineuse a fait l'objet depuis les années 1980 de plusieurs études dont les fondements se retrouvent dans les travaux de Roy Garstang (1986, 1989). Tous ces travaux se basent sur différents éléments physiques et propriétés de l'atmosphère qui sont résumés dans cette partie.

La modélisation des sources lumineuses

Tout d'abord, un modèle d'émission des sources lumineuses est nécessaire et le plus réaliste possible donnant l'intensité lumineuse émise exprimée en candelas dans chaque direction de l'espace. Ceci peut être obtenu de manière globale par des mesures expérimentales qui bénéficient récemment des images satellites comme celles du DSMP sur lequel est basé l'élaboration du premier atlas de pollution lumineuse mondial par l'équipe de Cinzano (Cinzano et al. 2001,2004) ou très bientôt à plus haute résolution à partir de l'ISS [1] (par Don Pettit de la NASA) mais encore par des mesures au sol sur le terrain du halo des villes (Walker et al 1978, Kowalesky 1984, photos fish-eye de Pierre Brunet [2] de l'ANPCEN, mesures au Sky Quality Meter fabriqué par Unihedron [3]) permettant de tester les modèles a posteriori. On peut aussi faire un calcul ab initio en ajoutant la contribution de chaque luminaire en prenant en compte à la fois la lumière directement émise au dessus de l'horizontale mais aussi la lumière réfléchie par le sol avec des coefficients de réflexion différent suivant la nature des surfaces éclairées (Aube et al 2007, Baddiley 2007, Lozi et al. 2008 pour l'AFA). Pourtant, un tel calcul nécessite d'une part une base de données complète des luminaires à l'échelle d'un territoire comme la France, contenant leur emplacement géographique et leurs caractéristiques aussi bien intrinsèques (flux lumineux, spectre de la lampe utilisée, ULOR) que propre à leur installation sur le terrain (hauteur des mâts, inclinaison, nature des sols), et d'autre part une puissance de calcul bien plus complexe à mettre en œuvre. On propose ici une modélisation intermédiaire à partir de données statistiques sur l'éclairage public à l'aide du programme Thotpro initialement crée par Michel Bonavitacola (1998) et développé depuis au sein de l'association LICORNESS qui contribue à l'expertise scientifique de l'ANPCEN.

1- http://eol.jsc.nasa.gov/EarthObservatory/Cities_at_Night_The_View_from_Space.htm
2- http://astrosurf.com/anpcn/communication/CD_ANPCN/PowerPoint/PierreBrunet/Panoramas%20%e0%20360%b0%20des%20d%f4mes%20de%20pollution.ppt
3- http://unihedron.com/projects/darksky/

*Docteur en physique de l'Université Joseph-Fourier et vice-président de LICORNESS *Contact :* nico.saturne@infonie.fr

Les modèles de propagation de la lumière

Ensuite, il faut tenir compte de l'atmosphère qui va diffuser la lumière et ainsi produire la pollution lumineuse à grande échelle. Les modèles (Garstang 1989, Cinzano 2004, Baddiley 2007) prennent en compte à la fois la diffusion Rayleigh par les molécules d'air mais aussi la diffusion de Mie par les aérosols constitués par les particules de poussières d'origine naturelle (sable, pollens,..) ou anthropique (rejets de poussières industrielles, particules fines dues aux voitures) et de la vapeur d'eau qui a tendance à accroître par condensation la taille des particules en suspension et ainsi le pouvoir diffusant de l'atmosphère. La diffusion Rayleigh a une distribution angulaire pratiquement isotrope alors que celle de Mie provoque une diffusion dominante vers l'avant privilégiant une propagation quasi rectiligne de la lumière dans la direction d'émission. D'autre part, cette dernière est beaucoup plus efficace que celle de Rayleigh d'un facteur typique de 100. La distribution angulaire de la diffusion bien contrainte pour les molécules l'est moins pour les aérosols car elle dépend de la distribution en taille et de la forme des particules ainsi que leur composition chimique. Cependant, les modèles actuels prennent en compte de manière assez réaliste ses principales caractéristiques que sont la diffusion vers l'avant et l'effet de rétrodiffusion. Quant à la stratification verticale de l'atmosphère, les modèles prennent généralement une distribution décroissante en exponentielle avec des densités et une échelle de hauteur caractéristique différentes pour les molécules et les aérosols respectivement voisine de 8 km et 1km. Il est très intéressant d'étudier l'évolution de la pollution lumineuse suivant les conditions météorologiques et en particulier en prenant en compte les particularités de la climatologie urbaine comme esquissé dans Bonavitacola (1995). Ce type de travail sera fait prochainement. Pourtant, on se concentrera dans cet article à conserver des conditions standards d'une atmosphère de bonne qualité caractérisée de manière globale par une visibilité horizontale homogène autour de 50km (similaire au cas K=0.5 de Garstang 1989) pour démontrer les éléments clés afin de maîtriser et limiter la pollution lumineuse. Les modèles prennent en compte souvent une diffusion simple (Baddiley 2007) ou les effets de la double diffusion (Garstang 1989, Cinzano 2001) ce qui est suffisant dans l'objectif d'observations astronomiques nécessitant une épaisseur optique de l'atmosphère la plus faible possible. Aube et al. (2007) prend en compte la diffusion multiple et retrouve des résultats similaire à Garstang pour des conditions atmosphériques comparables.

Les modèles des éclairagistes

Enfin, faisons une brève discussion sur les modèles des éclairagistes développés ces dernières années pour prendre en compte l'aspect environnemental de l'éclairage. Le modèle le plus intéressant est celui développé par l'AFE (2006) qui consiste à calculer le flux total perdu vers le ciel en incluant à la fois le flux émis directement au dessus de l'horizontale caractérisé par le paramètre ULOR (Upwards flux Light Output Ratio) qui exprime la fraction du flux total du luminaire émis directement vers le ciel et le flux réfléchi à la fois par la zone utile à éclairer (chaussée, place…) et par les alentours (façades de maisons mettant en évidence le problème de la lumière intrusive, jardins, espaces naturels,…) caractérisé par leur coefficient de réflexion respectif. Pourtant, ce type de modèle ne tient pas compte de la direction initiale d'émission de la lumière, paramètre fondamental dans la description physique de la propagation et des mécanismes de diffusion de la lumière dans un milieu optiquement mince comme notre atmosphère. Le modèles très récent d'OSP (Outdoor Site lighting Performance) de Brons, Bullough et Réa (2008) souffre du même problème en voulant quantifier la fraction de flux perdue vers le ciel en mesurant la moyenne de l'éclairement aux frontières d'une boîte imaginaire délimitant le domaine public où l'éclairage veut être mis en place, sans prendre en compte toutefois précisément la direction de la lumière incidente. Nous allons montrer l'importance

de cette direction d'émission initiale de la lumière dans ce qui suit mais on peut déjà en avoir une idée par une expérience de la vie de tous les jours lors d'une journée d'été ensoleillée. En plein midi, le soleil qui nous éclaire projette une ombre bien définie de notre corps car la lumière dispersée par les molécules de l'atmosphère et qui est responsable de la couleur bleu du ciel reste faible. Par contre, au coucher du soleil, la lumière traverse une couche d'atmosphère beaucoup plus grande et la lumière est très diffusée ce qui fait que nos ombres sont beaucoup moins définis. Il en est de même avec la lumière provenant des luminaires où les rayons lumineux émis proche de l'horizon vont être beaucoup plus diffusés que ceux proche de la verticale. Cette diffusion qui se fait principalement vers l'avant pour les aérosols va ainsi propager la lumière à grande distance de la source d'émission.

Le modèle Thotpro de Licorness

Notre modèle de propagation de la lumière se base principalement sur le formalisme développé par Garstang et Cinzano en intégrant la diffusion de Rayleigh et Mie dans une atmosphère stratifiée verticalement. Par contre, on inclut systématiquement les effets d'altitude à l'aide des mesures topographiques du satellite SRTM [1] avec une résolution au sol autour de 100m à nos latitudes et une précision sur l'altitude de l'ordre de 20m, et les effets de masquage par le relief. Ces effets sont importants à prendre en compte en particulier dans les zones de montagnes et peuvent faire apparaître des zones où l'environnement nocturne reste relativement épargné malgré la présence de centres urbains à proximité.

On utilise les statistiques publiées par l'ADEME pour connaître les principales caractéristiques de l'éclairage public en France. On en déduit ainsi qu'actuellement le nombre de luminaires par habitant est de 0.15 et que la puissance électrique moyenne par point lumineux est de 150W. En sachant qu'on a 60% de lampes au sodium haute pression en France, 30% de lampes au vapeur de mercure haute pression et 10% d'iodure métalliques, on en déduit le nombre de lumen émis en moyenne par un luminaire théorique avec un rendement énergétique moyen (LOR) de 80%. On utilise ensuite les statistiques sur la population en France publiées par l'INSEE mais aussi pour les pays limitrophes pour connaître le nombre de lumens émis par habitant. On estime ensuite la distribution photométrique moyenne angulaire émise par un lampadaire. Devant la diversité des types de lampadaires présents en France, la tâche peut paraître compliquée. Une grandeur très importante est l'ULOR pour connaître la quantité de lumière émise directement par le luminaire au dessus de l'horizontale. L'AFE recommande des ULOR < 3% pour l'éclairage fonctionnel et ULOR < 20% pour l'éclairage d'ambiance. Pourtant, dans la pratique, la mauvaise installation du matériel (probablement causé par une conception non optimisée) avec une inclinaison des crosses non nulle mais plutôt de 5 à 15° par rapport à l'horizontal voir plus dans certains cas augmente très fortement le flux émis au dessus de l'horizontale et qui part vers le ciel. Notre expérience sur le terrain et l'utilisation de logiciels créés par les éclairagistes comme Dialux [2] avec la plupart des luminaires et inclinaisons rencontrées montre un ULOR moyen sur le terrain autour de 14%, valeur adoptée pour notre simulation de référence.

1- http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/
2- http://www.dial.de/CMS/French/Articles/DIALux/Features/Features.html

Ensuite, la réflexion par le bitume et le milieu environnant est également pris en compte avec un coefficient de réflexion diffuse de 0.08 caractéristique des chaussées en France et un coefficient de réflexion spéculaire augmentant vers les incidences rasantes similaire aux travaux de Baddiley. L'effet de masquage par les bâtiments est également pris en compte partiellement pour la lumière réfléchie sur les parois verticales des bâtiments mais l'effet global dans les simulations reste négligeable. Lorsqu'on dispose de plus d'informations sur certaines communes en France ou dans les pays limitrophes, on les intègre à notre base de données pour améliorer la modélisation. Il est ainsi possible de tenir compte de pratique de réduction de l'éclairage en cours de nuit pour des cartes plus réalistes à un instant donnée. Les résultats que l'on obtient avec notre distribution statistiques de lampadaires (Figure 1) avec un ULOR de 14% se comparent très bien à la distribution des sources adoptée dans Garstang (1989) ou Cinzano (2000). De plus, des mesures sur le terrain valident également les résultats de notre modèle. La majorité des sources lumineuses prises en compte dans la base de données que nous avons compilé correspond aux villes de France mais on peut localement ajouter une source d'éclairage avec ses propres spécificités comme les péages d'autoroutes ou les monuments éclairés et isolés comme le viaduc de Millau.

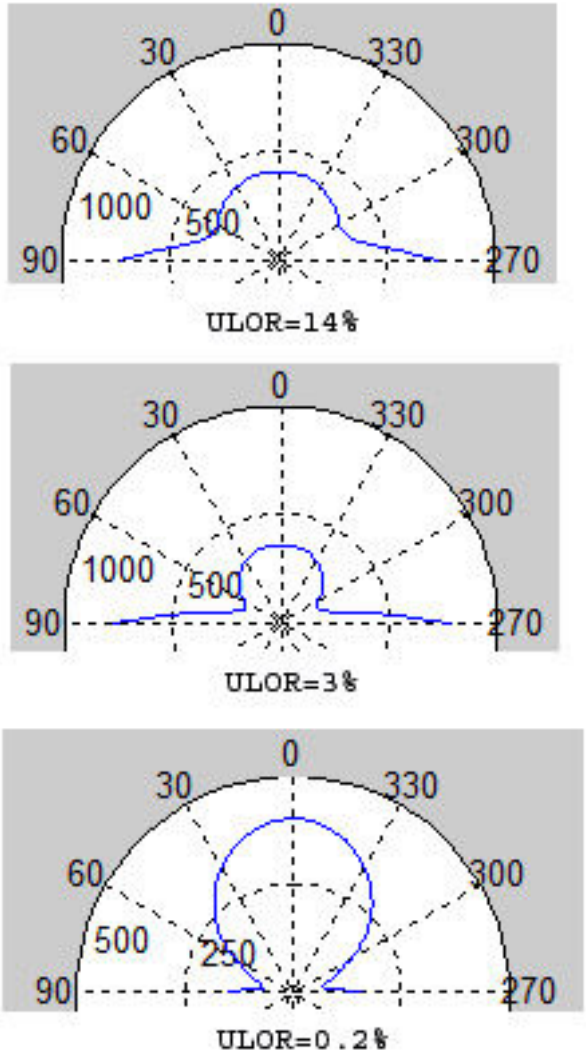


Figure 1 : Exemples de profils d'intensité lumineuse utilisés dans le modèle Thotpro pour les sources lumineuses pour des ULOR moyens respectifs de 14%, 3% et 0.2%. Les unités d'intensités sont arbitraires mais on remarquera que la contribution due à l'émission directe par les luminaires dans les 10 premiers degrés au dessus de l'horizontale n'est absolument pas négligeable pour un ULOR de 3%.

	Indice de pollution lumineuse	Qualité du ciel	Niveau sur l'échelle de Bortle	Perte de Magnitude du fond de ciel
	$q > 32$	Très mauvaise	$N > 7.5$	$d > 3,8$
	$10 < q \leq 32$	Mauvaise	$6,5 < N \leq 7,5$	$2,6 < d \leq 3,8$
	$4 < q \leq 10$	Passable	$5,5 < N \leq 6,5$	$1,75 < d \leq 2,6$
	$2,5 < q \leq 4$	Moyenne	$4,5 < N \leq 5,5$	$1,35 < d \leq 1,75$
	$1 < q \leq 2,5$	Correcte	$4,0 < N \leq 4,5$	$0,75 < d \leq 1,35$
	$0,5 < q \leq 1$	Bonne	$3,5 < N \leq 4,0$	$0,45 < d \leq 0,75$
	$0,32 < q \leq 0,50$	Très bonne	$3,0 < N \leq 3,5$	$0,3 < d \leq 0,45$
	$0,10 < q \leq 0,32$	Excellent	$2,0 < N \leq 3,0$	$0,1 < d \leq 0,3$
	$q \leq 0,10$	Référence	$N < 2$	$d < 0,1$

Figure 2 : Code de couleurs utilisé dans les cartes de pollution lumineuse obtenu avec Thotpro pour indiquer l'augmentation de la luminosité du ciel par rapport à la sa luminosité naturelle moyenné dans toutes les directions.

En pratique, on représente les résultats de nos calculs par une échelle de couleurs (Figure 2) correspondant au rapport q entre la luminosité du ciel polluée par l'éclairage artificiel moyennée pour tous les azimuts à une distance zénitale de 45°, et la luminosité naturelle du ciel considérée au moment du minimum du cycle d'activité solaire égale à $1,75.10^{-4}$ cd/m^2 soit 22 magnitude par arcseconde carrée pour la brillance du ciel au zénith dans la bande photométrique V en astronomie. Les différents niveaux de cette échelle ont été choisis pour correspondre approximativement à l'échelle de Bortle bien connue des astronomes amateurs pour quantifier qualitativement la qualité du ciel nocturne et en particulier le degré de pollution lumineuse. Les cieux les plus pollués sont en brun-rouge -orange-jaune avec une luminosité du ciel supérieure d'un facteur respectivement 32/10/4 et 2,5 à la luminosité naturelle. Un exemple de ce type d'environnement nocturne dégradé est présenté à la Figure 3. Le ciel nocturne redevient appréciable lorsque la luminosité artificielle du ciel devient proche de 100% de la luminosité naturelle ce qui correspond au niveau de couleur verte illustré à la Figure 4. Il y a encore peu d'études d'impact de la pollution lumineuse sur l'environnement nocturne faites à ce jour mais des travaux récents sur les batraciens anoures (Deslandres 2007) montrent par exemple que l'impact sur l'environnement commence à diminuer significativement à partir de ce niveau de pollution lumineuse. Enfin, les couleurs allant du bleu clair au bleu foncé correspondent à des cieux de moins en moins pollués jusqu'à ce que cette pollution devienne négligeable pour des zones en gris/blanc, l'éclairage artificiel ne contribuant alors que pour

10% au maximum à la luminosité naturelle à 45° de l'horizon, même s'il peut encore apparaître des halos lumineux diffus dans les premiers degrés au dessus de l'horizon.

Figure 3 : Photographie prise sur une colline à 3.5 km au Sud-Ouest de Chambéry correspondant au niveau orange de l'échelle de pollution lumineuse où la voie lactée est très rarement visible et seulement discernable à proximité du zénith.

Figure 4 : Photographie prise à 8 km au Sud-Ouest de Chambéry correspondant au niveau vert de l'échelle de pollution lumineuse où la voie lactée d'été dans la constellation du Sagittaire est bien visible jusqu'à 15° au dessus de l'horizon Sud. On remarque cependant le halo de l'agglomération grenobloise qui se trouve à 38 km et qui est bien visible dans le ciel jusqu'à 15° de hauteur.

Il est aussi important de remarquer que l'augmentation de luminosité artificielle du ciel donnée pour chaque niveau est une moyenne en azimut. Même si une augmentation de seulement 10% peut déjà paraître faible à 45° de hauteur, cela peut correspondre en pratique à une augmentation réelle de 50% de luminosité dans une certaine direction avec une obstruction de 40° en azimut affectant vraiment l'environnement nocturne dans cette direction, et seulement 5 % en moyenne pour les autres azimuts.

Les résultats des simulations avec Thotpro

La situation actuelle de la pollution lumineuse en Savoie

La simulation de référence présentée en Figure 5 montre la pollution lumineuse présente au niveau du département de la Savoie pour une atmosphère avec une très bonne transparence (visibilité voisine de 50 km).

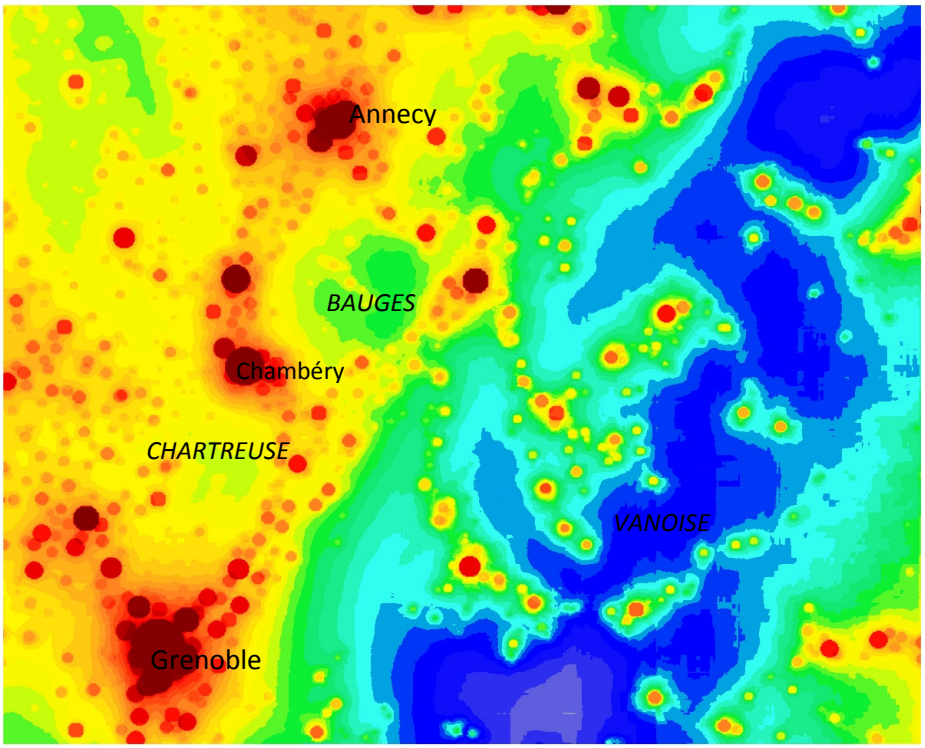


Figure 5 : Carte pour des luminaires avec un ULOR de 14% et une puissance électrique moyenne de 150W équivalent à un flux lumineux de15klm pour une technologie au sodium haute pression avec une atmosphère standard correspondant à une visibilité de 50 km.

On remarquera évidemment que la pollution lumineuse est la plus forte dans les grandes villes comme Chambéry, Grenoble et Annecy et que cette pollution ne reste pas confinée aux frontières des villes mais qu'elle se propage sur plusieurs dizaines de kilomètres autour de ces dernières, ce qui fait par exemple que les parcs régionaux de Chartreuse et des Bauges bien qu'étant peu peuplés soient impactés et que la qualité du ciel, bien que restant plutôt bonne grâce notamment aux effets combinés de l'altitude et du masquage par le relief, ne soit pas exceptionnelle. La zone centrale du Parc de la Vanoise reste de très bonne qualité alors que sa zone périphérique se dégrade avec le sur-

éclairage de nos stations de ski combiné à l'utilisation de luminaires de style souvent peu efficace avec des ULOR > 20%. Pour une étude systématique de la pollution lumineuse dans les parcs régionaux et nationaux de France, nous invitons le lecteur à se reporter à une étude antérieure (Deslandres 2006) qui sera bientôt mise à jour avec ce modèle plus réaliste.

La pollution lumineuse n'est pas causée par la pollution atmosphérique

Regardons maintenant l'effet sur la pollution lumineuse d'une atmosphère parfaite sans aérosols où la lumière peut alors se propager sur des centaines de kilomètres sans être diffusée. La simulation correspondante est présentée à la Figure 6. On remarque que bien que la pollution est parfois légèrement plus limitée surtout à proximité des villes, on ne retrouve pas d'endroits non touchés, même éloignés des villes. On montre ainsi que les nuisances lumineuses comme certains préfèrent à les qualifier sont toujours présentes même en l'absence de pollution atmosphérique que ce soit en milieu urbanisé ou rural, et qu'elles sont véritablement la cause de pratiques non optimales en éclairage public. On peut remarquer que cette pollution est même légèrement supérieure dans les endroits très isolés comme la zone centrale du parc national de la Vanoise, ce qui s'explique par le fait que l'effet d'extinction de la lumière lors de sa propagation est plus faible en absence d'aérosols. La pollution atmosphérique ne peut ainsi être qu'un facteur aggravant localement à proximité des centres urbains car l'augmentation d'aérosols finit à longue distance par accroitre l'extinction de la lumière.

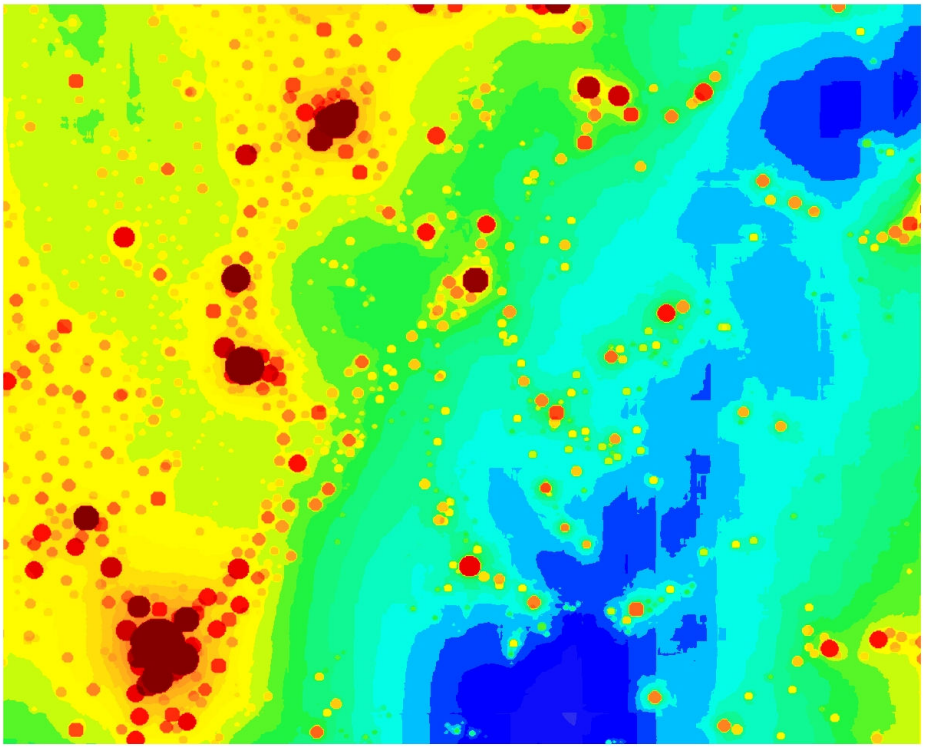


Figure 6 : Carte pour des luminaires avec un ULOR de 14% et une puissance électrique moyenne de 150W équivalent à un flux lumineux de 15 klm avec une atmosphère parfaite sans aérosols.

Une prescription sur l'ULOR< 3% pour les luminaires de type fonctionnels est insuffisante

On peut maintenant regarder l'effet d'une optimisation des luminaires en éclairage public en prenant comme cas typique celui de la généralisation à tout le parc de luminaires français de la préconisation de l'AFE sur l'ULOR <3% pour tous les types d'usage aussi bien fonctionnels que décoratifs et en conservant des lampadaires avec une puissance moyenne de 150W. Ceci obligera notamment tous les luminaires à être installés avec une inclinaison minimal (< 10°) et de supprimer tous les lampadaires décoratifs de type « boule ». On obtient alors une réduction faible de la pollution lumineuse (Figure 7), ce qui montre que ce type de mesures n'est pas suffisant pour maîtriser la pollution lumineuse. D'autres simulations avec une diminution progressive de ce paramètre ULOR montre une amélioration constante sur la limitation de la pollution lumineuse.

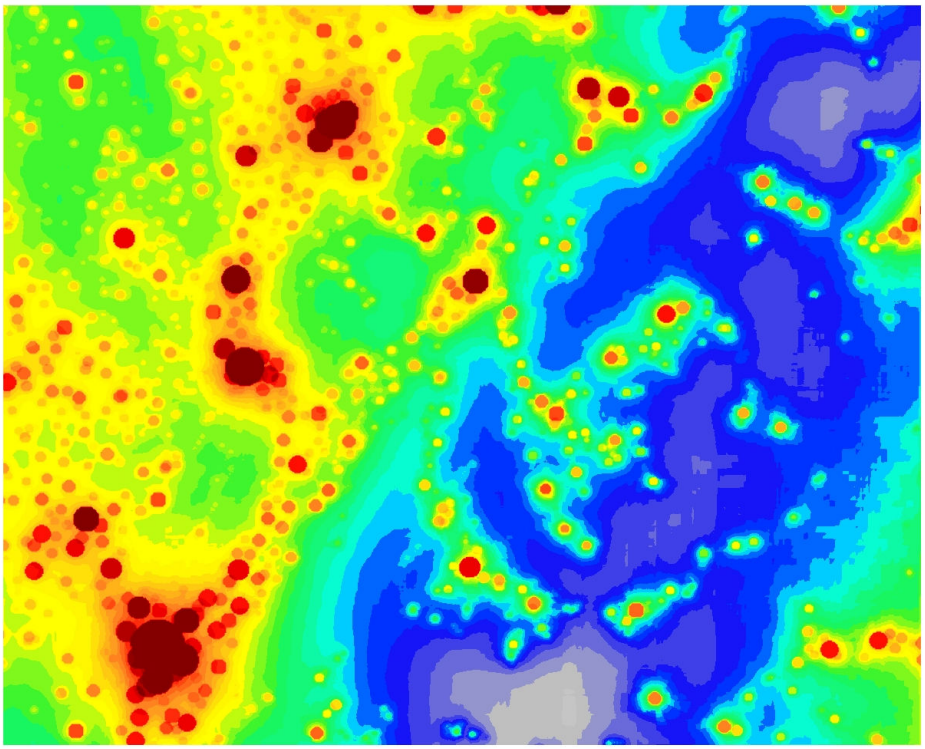


Figure 7 : Carte pour des luminaires avec un ULOR de 3% et une puissance moyenne de 150W

L'utilisation de luminaires complètement défilés est nécessaire et à généraliser

Etudions maintenant le cas où on n'autorise plus que des luminaires sans émission au dessus de l'horizontale i.e. avec un ULOR strictement nul tout en conservant la même puissance moyenne par lampadaire égale à 150W. C'est le cas des lampadaires complètement défilés. Dans ce cas, seul la partie réfléchie par le sol du flux lumineux part vers le ciel principalement pour des angles au dessus de 45°. On observe alors pour cette simulation (Figure 8) que la pollution est vraiment réduite dès qu'on s'éloigne des grandes villes de quelques kilomètres avec une majorité de zones bleues et grises. Par contre, la pollution lumineuse reste très présente au cœur des villes. Il faut souligner ici que la modélisation à l'intérieur d'une ville n'est pas assez précise dans notre cas car il faudrait tenir

compte de la vraie distribution spatiale alors qu'ici on considère une distribution spatiale isotrope de luminaire pour chaque ville.

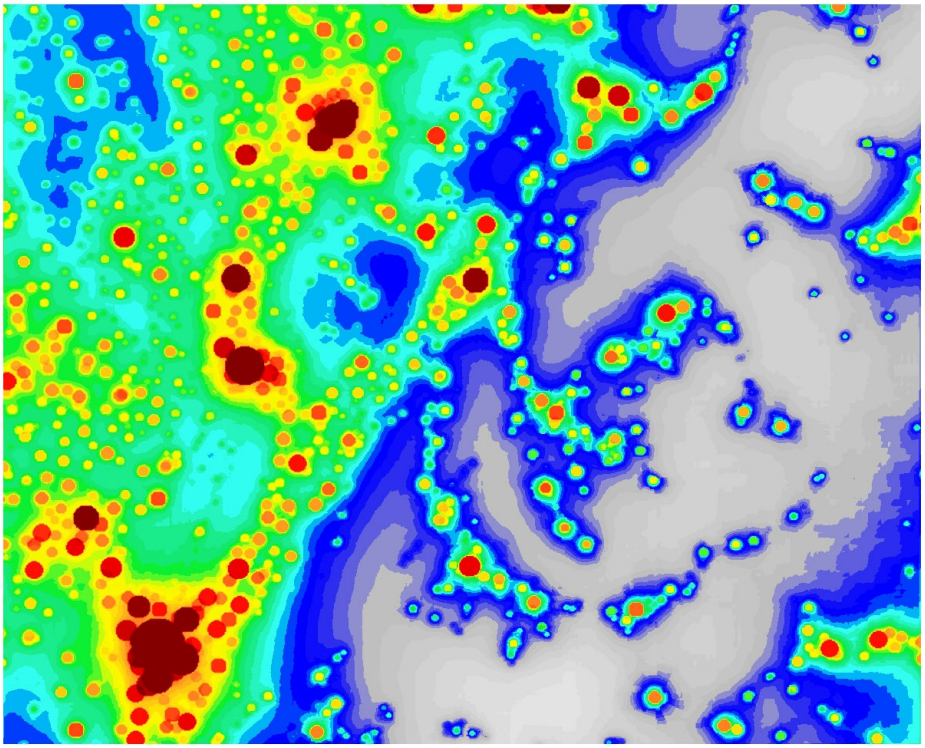


Figure 8 : Carte pour des luminaires avec un ULOR nul qui correspond au cas des luminaires complètement défilés et avec une puissance moyenne de 150W

Ce type de résultat est similaire à celui de Soardo (2008) bien qu'en totale contradiction avec son sujet d'étude initial. En effet, Soardo considère que pour limiter la pollution lumineuse, il est inutile d'utiliser des lampadaires complètement défilés car toute émission de lumière provenant de n'importe quel type de luminaire, à cause de l'effet de masquage par les bâtiments l'entourant, peut être modélisée par une source lambertienne avec comme flux émis celui donné par la somme de la contribution de l'ULOR plus celui dû à la réflexion sur le sol, même si la réelle direction d'émission de la lumière est faussée par son hypothèse d'une source « diffuse » équivalente. Par contre, ceci consiste justement en fin de compte à modéliser un lampadaire complètement défilé avec un sol dont la réflexion est de type diffuse ! En réalité, l'effet d'écran des bâtiments pour la lumière émise directement au dessus de l'horizontal n'est effectif que dans les centres urbains très denses avec des rues étroites et une grande hauteur des bâtiments ce qui constitue une partie très faible des luminaires d'une ville. En effet, lorsqu'on s'élève sur une colline à proximité d'une grande ville, on observe le flux émis directement par de nombreuses sources lumineuses (voir Figure 3) et de toute façon le flux émis dans une direction parallèle à l'axe d'une route ne peut pas être stoppé efficacement. On voit bien avec cette simulation que tous les rayons lumineux provenant d'un luminaire n'ont pas la même importance du point de vue de la génération de la pollution lumineuse. S'il est vrai que le flux réfléchi prédomine en intensité (jusqu'à 7% de flux total émis par le luminaire en éclairage fonctionnel en pratique avec des revêtements de chaussée classique du type R2) dans le flux total potentiellement perdu vers le ciel nommé UPF dans les calculs de l'AFE, cette contribution reste localisée et la majorité de ce flux est envoyée dans l'espace (sauf en présence de nuages) alors

que le flux directement émis juste au dessus de l'horizontale même s'il représente moins de 3% du flux total du luminaire peut se propager dans la basse atmosphère sur de grandes distances.

De manière plus précise, la contribution du flux réfléchi sur une chaussée lambertienne de coefficient de réflexion 0 .08 entre 0 et 15° de hauteur où il peut participer efficacement à la pollution lumineuse à grande distance (> 14km) est inférieure à 0.6% du flux lumineux total du luminaire, dans les cas où le masquage par la végétation ou les bâtiments n'est pas efficace. On voit ainsi que si on permet un ULOR de seulement 1% ou 3% pour un luminaire, la pollution lumineuse sera augmentée respectivement d'au moins 266% ou 600% à grande distance de cette source pour ces directions considérées par rapport à un luminaire complètement défilé où on a strictement ULOR=0. L'impact sur l'environnement nocturne devenant appréciable lorsque la luminosité du ciel augmente de 10% par rapport à sa luminosité naturelle et en considérant la limite supérieure de 0.6% dû au flux réfléchi irréductible dans le cas où il est nécessaire d'éclairer, on doit alors avoir ULOR<0.06% pour limiter efficacement la pollution lumineuse à distance de la source. Cette nécessaire stricte restriction est à rapprocher de l'intensité lumineuse maximale au niveau de l'horizontale de 0,49 cd/klm permise par la loi italienne en Lombardie.

La conclusion de cette simulation est donc qu'il est nécessaire de généraliser l'emploi des lampadaires complètement défilés contrairement à l'avis de certains éclairagistes, et la plupart du temps également avec une inclinaison nulle par rapport à l'horizontale car de nombreux luminaires de ce type ont un flux lumineux non nul très vite en dessous de l'horizontale. Pour des lampadaires encore mieux conçus, on pourra se permettre de les incliner de quelques degrés si le diagramme photométrique du luminaire est compatible avec un ULOR strictement nulle dans cette configuration. Enfin nous tenons à signaler que ce type de lampadaire obligatoirement à vasque plane ou avec un paralume efficace bloquant toute lumière au dessus de l'horizontale permet la plupart du temps une meilleure uniformité d'éclairage et un espacement plus grand entre luminaires contrairement à certaines contre-vérités pour une luminance moyenne donnée. Nous montrerons dans un prochain article différentes situations où on peut atteindre un rapport hauteur de mat sur espacement bien supérieur à 3 qui reste la norme dans beaucoup d'installations d'éclairage tout en respectant une uniformité d'éclairement en accord avec la norme européenne EN13201. Nous invitons le lecteur à consulter l'annexe de cet article pour un exemple concret modélisé avec le logiciel de conception d'éclairage public Dialux.

Une dérogation sur l'ULOR pouvant atteindre 20% pour les luminaires des centres villes pourra être prise si la hauteur minimale des parois verticales des bâtiments l'entourant est supérieure à la somme de la hauteur du mât et de la distance aux parois verticales pour tous les azimuts. Cette mesure limitera ainsi fortement l'émission de lumière directe en dessous de 45° de hauteur qui cause la majorité de la pollution lumineuse à grande distance. Il faudra bien entendu cependant que ce type d'éclairage limite également la lumière intrusive dans l'espace privé de chaque habitant, ce qui est difficilement conciliable avec ce type de luminaires.

Une limitation des niveaux d'éclairage pour éclairer juste

Enfin, intéressons-nous à une diminution globale de la puissance lumineuse utilisée en éclairage public tout en conservant la nature complètement défilé des luminaires. Cette mesure se justifie par un sur-éclairage en général des rues en France. Un éclairement moyen au sol d'au plus 10 lux devrait

être la norme dans la grande majorité des cas ce qui correspond quand-même à l'équivalent de 40 pleine lunes.

Cette baisse des niveaux d'éclairage se base sur le bon sens et se démarque des niveaux de luminances et d'éclairement préconisés dans la norme EN13201. La luminance moyenne devrait être plafonnée à 1 cd/m^2 mais sans descendre en dessous de 0.3 cd/m^2 pour les voies de circulation. En effet, une grande partie des niveaux dépassant ce seuil s'explique par une ambiance lumineuse trop élevée dans les villes qui est la conséquence de pratiques de sur-éclairage en chaîne depuis des années. On peut montrer qu'une majorité de l'éclairage peut être ainsi obtenue en utilisant des lampes au sodium haute pression de 50 et 70W associés à des ballasts électroniques assurant une grande efficacité énergétique tout en maximisant le facteur d'utilisation de chaque luminaire. C'est d'ailleurs la pratique conseillée dans le cahier des clauses techniques particulières pour l'éclairage public de l'ANPCEN qui propose de plafonner les puissances lumineuses linéaires comme cela a déjà été fait en Suisse et c'est en cohérence avec les labels européens « Cité de l'énergie » et l'EEA (European Energy Award). De plus, l'éclairage des routes en dehors des villes est une absurdité puisque les voitures ont leur propre système d'éclairage embarqué et l'utilisation de la signalisation passive réfléchissante est vraiment la solution parfaite sur tous les plans, qu'ils soient économiques, sécuritaires et écologiques.

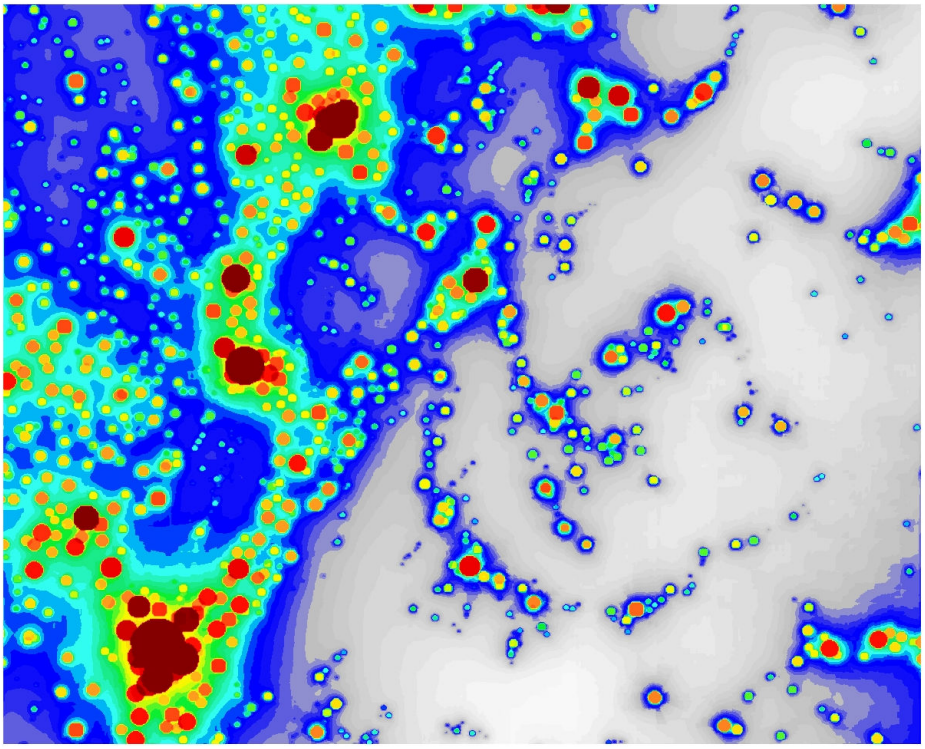


Figure 9 : Carte pour des luminaires avec un ULOR nul et une puissance réduite à 70W.

La dernière simulation présentée va dans ce sens en considérant toujours un ensemble de luminaires complètement défilés mais cette fois-ci avec une puissance moyenne de 70W. On obtient alors une pollution encore plus réduite (voir Figure 9) et tranchant vraiment avec la situation présente de la figure 5. Le ciel devient d'une très grande qualité dès qu'on s'éloigne des centre-villes

tout en conservant un éclairage public basé sur l'efficacité d'éclairer là où il faut et quand c'est nécessaire avec le juste niveau.

Conclusion

On a montré dans cet article à partir d'une modélisation de la pollution lumineuse la plus réaliste possible que la principale mesure nécessaire et suffisante pour limiter la pollution lumineuse et son impact sur l'environnement est de généraliser l'emploi de luminaires complètement défilés avec aucune émission de lumière émise au dessus de l'horizontale dans les conditions d'utilisations en éclairage public. On a également montré que la réduction globale des puissances lumineuse de 150 à 70W est très intéressante et tout à fait envisageable avec la technologie actuelle au sodium haute pression. On précise d'ailleurs que l'utilisation de sources à lumière blanche comme les iodures métalliques ou LED, beaucoup plus nocives pour l'environnement nocturne, devront faire l'objet d'une utilisation très encadrée où les niveaux d'éclairements devront être revu à la baisse pour tenir compte de la plus grande diffusion de la lumière dans les courtes longueurs d'onde, et à réserver pour l'éclairage dans les centres villes (voir prochainement l'article d'Alain Legue).

La recherche d'une efficacité photométrique maximale en éliminant le flux directement émis au dessus de l'horizontale et en éclairant au juste niveau reste donc la solution à privilégier pour optimiser l'éclairage public et ainsi minimiser son impact sur l'environnement nocturne.

Références

Aubé, M. , FranchommeFossé, L., RobertStaehler, P., Houle, V., 2007, *Light Pollution Modelling and Detection in a Heterogeneous Environment: Toward a Night Time Aerosol Optical Depth Retrieval Method*

AFE, *Les nuisances dues à la lumière - Eclairages extérieurs - édition 2006*

Baddiley**,** C. J. and Webster**,** T**.** (2007) Towards *understanding skyglow. A contribution to the discussion. Dorset UK British Astronomical Association, Campaign for the Dark Sky, and Rugby UK. Institution of Lighting Engineers.*

Bonavitacola, M., 1995, *Notions de climatologie urbaine, Premier Congrès National de protection de l'environnement nocturne à Rodez, p.169*

Bonavitacola, M., 1998, *Le programme Thot, Deuxième Congrès National de protection de l'environnement nocturne à Rodez, p. 249*

Brons, J.A., Bullough, J.D. & Rea, M.S., 2008, *Outdoor Site-Lighting Performance: A Comprehensive and Quantitative Framework for Assessing Light Pollution, Lighting Research and Technology, Vol. 40, No. 3, 201-224*

Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D., 2001. *The first world atlas of the artificial night sky brightness, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 328, 689-707.*

Cinzano, P., Elvidge, C.D., 2004, *Night sky brightness from DMSP-OLS satellite measurements, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 353, 1107-1116.*

Cinzano, P., Falchi, F., Diaz Castro, F. J., 2000. *The Artificial Sky Luminance and the Emission Angles of the Upward Light Flux, Measuring and Modelling Light Pollution, ed. P. Cinzano, vol.71, 251-256*

Deslandres, B., 2006, *Etude d'impact de la pollution lumineuse sur la faune et la flore :Etat des lieux dans les parcs et réserves naturelles de France, Stage L2 Université Paul Sabatier - Licorness*

Deslandres, B., 2007, *Etude d'impact de la pollution lumineuse sur les batraciens Anoures, Stage L3 Université Paul Sabatier - Licorness*

Garstang, R.H, 1986, *Model for Artificial Night-Sky Illumination, Pub. Astron. Soc. Pacific 98, 364.*

Garstang, R.H, 1989, *Night sky brightness at observatories and sites, Pub. Astron. Soc. Pacific 101, 306.*

Kovalevski, J. & Barlier, F., 1984, *Rapport du Groupe de Travail sur la Protection des Observatoires astronomiques et Géophysiques Institut de France - Académie des Sciences*

Lozi,J., Bak, A., Azzam, E., Ferachoglou, N., Maucort, G., Mayneris, D., 2008, *Etude scientifique de la pollution lumineuse, Rapport Opto-Services pour l'Association Française d'Astronomie.*

Soardo, P. ,Iacomussi, P., Rossi, G., Fellin, L., 2008, *Compatibility of road lighting with star visibility, Lighting Research and Technology, Vol. 40, No. 4, 307-322*

Walker, M. F., 1977, *The effects of urban lighting on the brightness of the night sky, , Pub. Astron. Soc. Pacific 89, 405.*

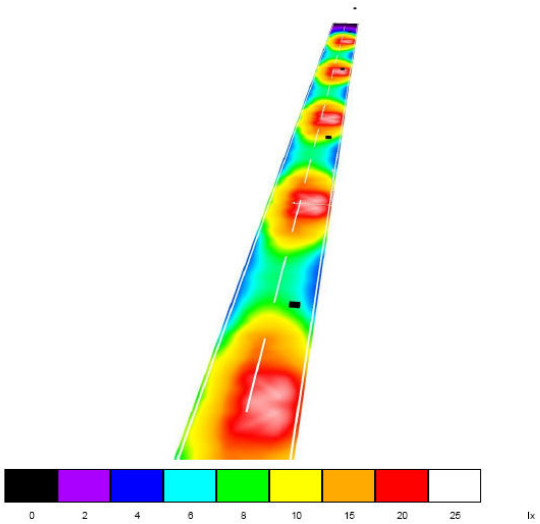
Annexe : Comparaison avec Dialux d'installations d'éclairage avec lampadaire complètement défilé ou lampadaire de la même marque à vasque bombée

Pour argumenter sur le fait que les lampadaires complètement défilés, ou Full Cut-Off (FCO) en anglais, ne nécessitent pas des espacements plus faibles que les autres luminaires et qu'en fait ils permettent au contraire les meilleurs performances photométriques toute chose égale par ailleurs en n'émettant aucune lumière directe au dessus de l'horizontale, voici cette étude que j'ai réalisé sous Dialux pour les luminaires iridium de Philips équipés de lampes 70W au SHP et que je présente dans les pages suivantes.

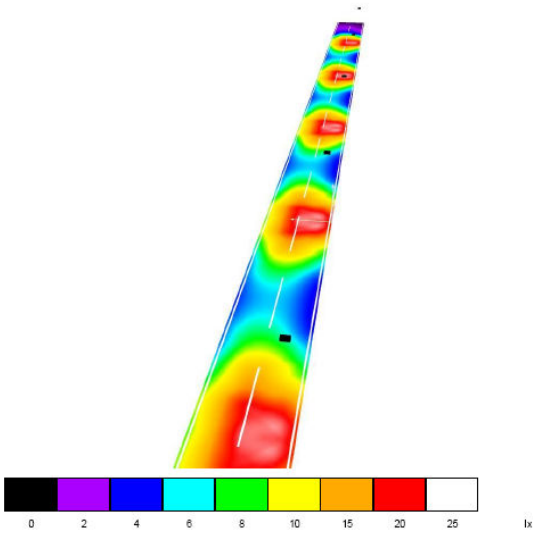
Il y a le cas complètement défilé (rue 1) équipé d'une vasque plane comparé au cas avec une vasque bombée (rue 2). Dans les deux cas, les luminaires sont à une hauteur de 7,5m et espacés de 32,4m soit un rapport hauteur/espacement ~4.3 bien supérieur à 3 et sans inclinaison pour ne pas avoir d'émission directe de lumière dans le cas FCO avec ULOR=0% et limiter cette dernière dans l'autre cas avec ULOR=0,51%. Les caractéristiques photométriques recherchées sont celle d'une départementale traversant un village par exemple avec une luminance moyenne recherchée de 0.75 cd/m^2.

On voit que dans ce cas, seul le FCO parvient à maintenir ce niveau de luminance et que l'uniformité d'éclairement est meilleure (voir rendu 3D) avec un éclairement moyen au sol de 11 lux et en minimisant également l'éblouissement. Le luminaire à verre bombée nécessite en fait un espacement plus faible ou une lampe d'une puissance supérieure entraînant alors un sur-éclairage pour respecter le niveau de luminance pour ce type de voies. On montre ainsi par cet exemple que les FCO sont gagnants sur tous les plans (économie, écologie, photométrie ....). Il faut remarquer que les luminaires utilisés ici disposent encore de ballasts ferromagnétiques et que le passage à des ballasts électroniques améliorerait encore les rendements énergétiques. Il est indispensable de maintenir le luminaire à l'horizontale car pour le FCO avec une inclinaison de 5°, on a déjà un ULOR=0,03%.

Rue 1 / Rendu fausses couleurs



Rue 2 / Rendu fausses couleurs



Editeur (trice)
Téléphone
Fax
Email

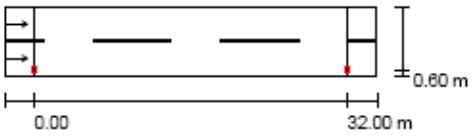
Rue 1 / Données de planification

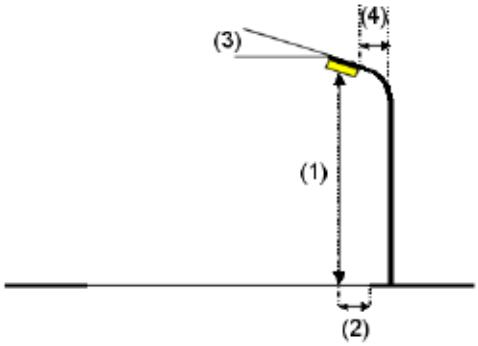
Profil de la rue

Chaussée 2 (Largeur: 7.000 m, Nombre de voies: 2, Revêtement: R2, q0: 0.070)

Facteur d'entretien: 0.85

Disposition des luminaires





Luminaire:	Philips IRIDIUM 9 SGS252 FGD 1xSON-TPP70W CON CR P5X
Flux lumineux de(s) lampe(s):	6600 lm
Puissance par luminaire:	81.0 W
Disposition:	d'un côté, en bas
Espacement poteau:	32.000 m
Hauteur de montage (1):	7.855 m
Hauteur du point d'éclairage:	7.600 m
Saillie (2):	0.600 m
Inclinaison du bras (3):	0.0 °
Longueur du bras (4):	1.000 m

Valeurs maximales de l'intensité lumineuse

pour 70°:	413 cd/klm
pour 80°:	15 cd/klm
pour 90°:	0.00 cd/klm

Dans chacune des directions qui, pour les luminaires installés et utilisables, forment avec la verticale inférieure l'angle indiqué.

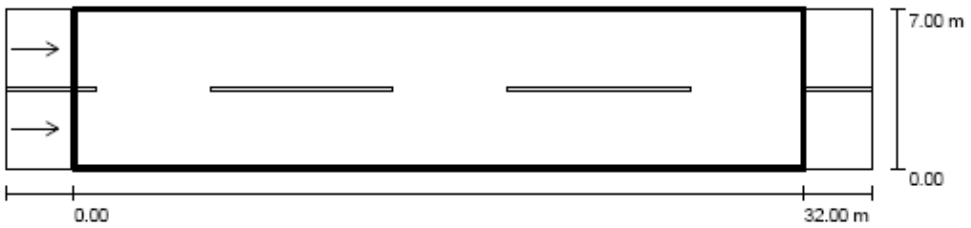
Pas d'intensité lumineuse au-dessus de 90°.

La disposition répond à la classe d'intensité lumineuse G4.

La disposition répond à la classe d'indice d'éblouissement D.6.

Editeur (trice)
Téléphone
Fax
Email

Rue 1 / Champ d'évaluation Chaussée 2 / Aperçu des résultats



Facteur d'entretien: 0.85

Echelle 1:272

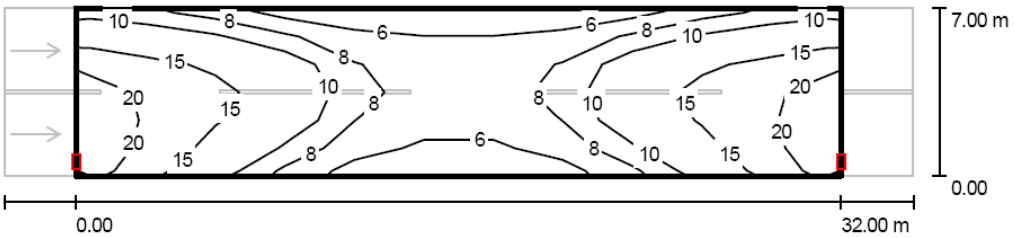
Trame: 11 x 6 Points
Eléments de rue correspondants: Chaussée 2.
Revêtement: R2, q0: 0.070
Classe d'éclairage choisie: ME4a (Toutes les exigences photométriques sont remplies.)

	L_{moy} [cd/m²]	U0	UI	TI [%]	SR
Valeur effective selon calcul:	0.75	0.5	0.6	11	0.5
Valeurs de consigne selon la classe:	≥ 0.75	≥ 0.4	≥ 0.6	≤ 15	≥ 0.5
Rempli/Non rempli:	✓	✓	✓	✓	✓

Observateurs correspondants (2 qté.):

N°	Observateur	Position [m]	L_{moy} [cd/m²]	U0	UI	TI [%]
1	Observateur 3	(-60.000, 1.750, 1.500)	0.75	0.5	0.6	11
2	Observateur 4	(-60.000, 5.250, 1.500)	0.78	0.5	0.7	7

Rue 1 / Champ d'évaluation Chaussée 2 / Courbes isolux (E)



Valeurs en Lux, Echelle 1 : 272

Trame: 11 x 6 Points

E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_{moy}	E_{min} / E_{max}
11	4.96	23	0.434	0.214

Editeur (trioe)
Téléphone
Fax
Email

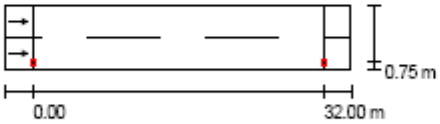
Rue 2 / Données de planification

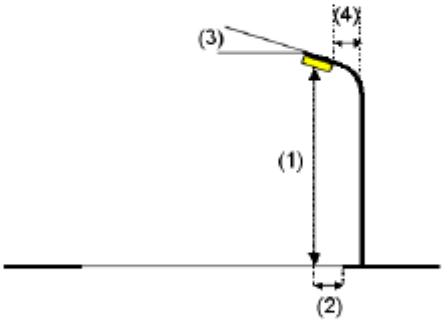
Profil de la rue

Chaussée 1 (Largeur: 7.000 m, Nombre de voies: 2, Revêtement: R2, q0: 0.070)

Facteur d'entretien: 0.85

Disposition des luminaires





Luminaire:	Philips IRIDIUM 9 SGS252 PC 1xSON-TPP70W CON CR P5X
Flux lumineux de(s) lampe(s):	6600 lm
Puissance par luminaire:	81.0 W
Disposition:	d'un côté, en bas
Espacement poteau:	32.000 m
Hauteur de montage (1):	7.863 m
Hauteur du point d'éclairage:	7.600 m
Saillie (2):	0.750 m
Inclinaison du bras (3):	0.0 °
Longueur du bras (4):	1.000 m

Valeurs maximales de l'intensité lumineuse

pour 70°:	476 cd/klm
pour 80°:	40 cd/klm
pour 90°:	4.60 cd/klm

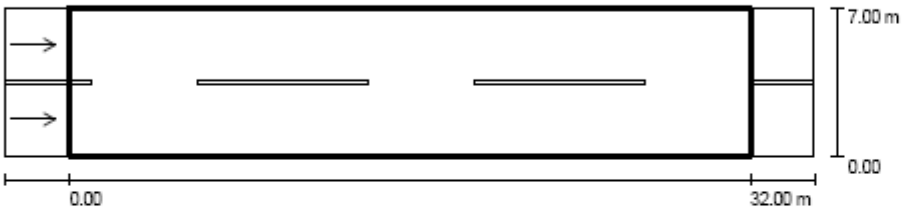
Dans chacune des directions qui, pour les luminaires installés et utilisables, forment avec la verticale inférieure l'angle indiqué.

La disposition répond à la classe d'intensité lumineuse G3.

La disposition répond à la classe d'indice d'éblouissement D.6.

Editeur (trice)
Téléphone
Fax
Email

Rue 2 / Champ d'évaluation Chaussée 1 / Aperçu des résultats



Facteur d'entretien: 0.85

Echelle 1:272

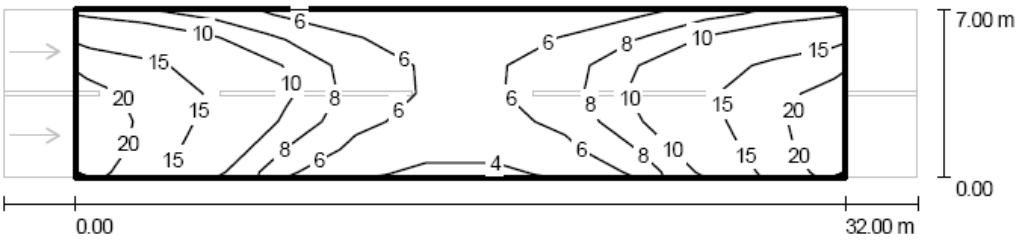
Trame: 11 x 6 Points
Eléments de rue correspondants: Chaussée 1.
Revêtement: R2, q0: 0.070
Classe d'éclairage choisie: ME4a (Toutes les exigences photométriques ne sont pas remplies.)

	L_{moy} [cd/m²]	U0	UI	TI [%]	SR
Valeur effective selon calcul:	0.73	0.5	0.7	13	0.5
Valeurs de consigne selon la classe:	≥ 0.75	≥ 0.4	≥ 0.6	≤ 15	≥ 0.5
Rempli/Non rempli:	✗	✓	✓	✓	✓

Observateurs correspondants (2 qté.):

N°	Observateur	Position [m]	L_{moy} [cd/m²]	U0	UI	TI [%]
1	Observateur 1	(-60.000, 1.750, 1.500)	0.73	0.5	0.7	13
2	Observateur 2	(-60.000, 5.250, 1.500)	0.76	0.5	0.8	10

Rue 2 / Champ d'évaluation Chaussée 1 / Courbes isolux (E)



Valeurs en Lux, Echelle 1 : 272

Trame: 11 x 6 Points

E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{min} / E_{moy}	E_{min} / E_{max}
10	3.87	23	0.370	0.169