

Mesure et modélisation de la pollution lumineuse

Philippe Deverchère, Sébastien Vauclair, Michel Bonavitacola

Février 2018

Si la lutte contre la pollution et les nuisances lumineuses s'inscrit de plus en plus dans les politiques publiques, la méthodologie de la mesure et de la modélisation de la lumière artificielle la nuit n'est, elle, que trop peu souvent détaillée. Cet article expose deux exemples concrets d'application : un cas pratique sur la modélisation d'une trame sombre et une simulation de la contribution du mobilier urbain à la pollution lumineuse dans un milieu fortement urbanisé. Ces cas pratiques ont été mis en œuvre par le bureau d'étude DarkSkyLab.

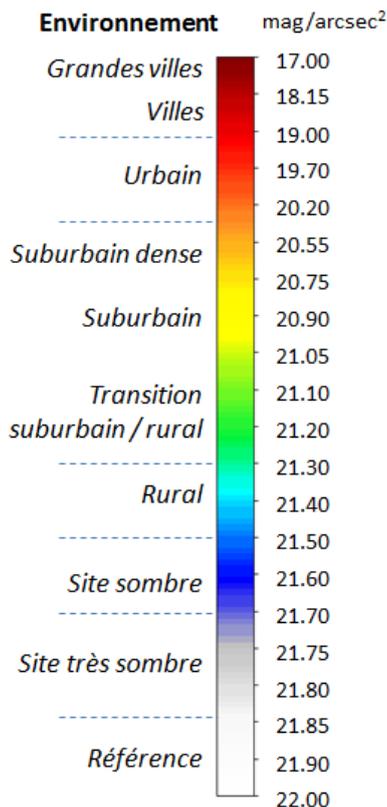
I. METROLOGIE DE LA POLLUTION LUMINEUSE

La capacité à mesurer la brillance du fond de ciel nocturne constitue un prérequis fondamental pour mener à bien une étude sérieuse de la pollution lumineuse. De plus, ces mesures doivent être réalisées dans des environnements variés, depuis le sommet d'une montagne isolée jusqu'à des environnements urbains fortement pollués par la lumière artificielle. Elles doivent aussi être facilement répétables sur de longues durées afin de s'affranchir de conditions d'observation spécifiques telles que la présence de nuages, la qualité du ciel ou bien encore la présence de la Lune.

Face à ce constat, il est apparu clairement que pour progresser et délivrer des résultats de qualité, il devenait nécessaire de développer une approche scientifique innovante permettant de mesurer et enregistrer la brillance du fond de ciel nocturne, appelée **NSB** (*Night Sky Brightness* en anglais) dans le reste de cet article.

La brillance de fond de ciel se mesure au moyen d'un **SQM** (*Sky Quality Meter*) et elle est traditionnellement exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$). Cette

unité est celle d'une mesure logarithmique dérivée de la magnitude photométrique largement utilisée en astronomie. Sur cette échelle, les valeurs les plus élevées correspondent aux brillances les plus faibles. La figure ci-contre montre la correspondance entre les valeurs de NSB et les environnements dans lesquelles elles sont rencontrées. On notera sur cette échelle qu'une petite variation de la valeur de NSB a de plus grands effets aux faibles brillances de ciel (sites sombres)



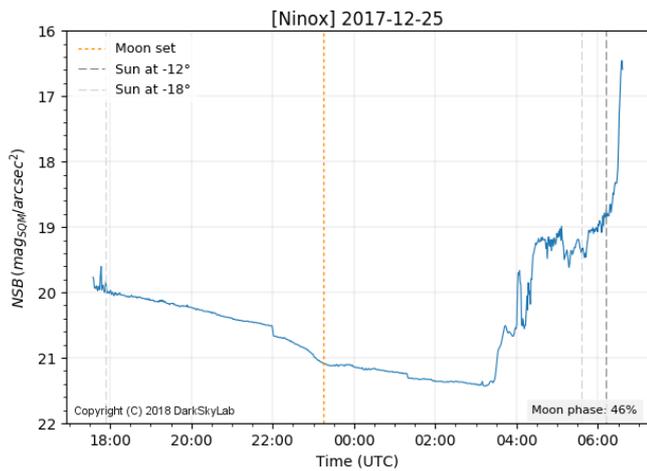
qu'aux fortes brillances (ciels pollués).

L'approche traditionnelle consistant à utiliser un SQM à bout de bras pour réaliser des mesures individuelles atteint très vite des limites pour la production de données réellement utilisables d'un point de vue scientifique. Cela est dû essentiellement aux problèmes d'accès aux sites où les mesures doivent être conduites, aux difficultés logistiques (mesures de nuit, disponibilité de moyens humains) et à l'impact du cycle de la Lune et des conditions météorologiques sur les valeurs de luminosité du fond de ciel enregistrées.

Pour répondre à cette problématique, une plateforme appelée Ninox a été créée. Les données sont enregistrées nuit après nuit, à une fréquence d'environ une par minute, quelles que soient les conditions météorologiques, et elles sont ensuite traitées de manière statistique plutôt que sur la base de mesures individuelles discrètes. La caractérisation d'un lieu donné en termes de brillance de fond de ciel peut ainsi être réalisée de manière beaucoup plus efficace et fiable. Des indicateurs tels que l'évolution du NSB au cours d'une nuit claire sans Lune ou bien la différence moyennée entre le NSB d'une nuit claire et celui d'une nuit couverte peuvent être utilisés pour améliorer la caractérisation d'un site ou bien pour comparer différents sites entre eux. L'image ci-dessous montre un système Ninox installé de manière permanente au sommet du Pic du Midi.



A titre d'exemple, la figure ci-dessous montre le résultat d'une acquisition Ninox réalisée durant la nuit du 25 décembre 2017 depuis un petit village du Sud de la Bourgogne.



Ce simple tracé est déjà riche en informations et l'on peut y repérer quelques évènements spécifiques tels que l'influence de la Lune à son premier quartier (avec l'accélération caractéristique de la diminution de la brillance du fond de ciel au moment du coucher de Lune), l'amélioration progressive du NSB au cours de la nuit, l'extinction de l'éclairage public (à 22:00 TU) et des lumières de la maison voisine (peu après 01:00 TU), ou bien encore l'arrivée des nuages en fin de nuit qui produit un profil perturbé caractéristique de ce genre de conditions. En utilisant ce tracé, on peut donner une première estimation de la valeur maximale du NSB que l'on est susceptible d'atteindre sur ce site, de l'ordre de 21,4 mag/arcsec², ce qui est typique d'un ciel rural.

Comme on le voit sur la courbe précédente, un ensemble de mesures réalisées au cours d'une seule nuit claire (ou en partie claire) présente déjà un intérêt certain. Toutefois, l'objectif de la plateforme Ninox est de pouvoir réaliser des mesures sur un grand nombre de nuits (plusieurs semaines ou plusieurs mois). Cela permet en effet d'interpréter les données de manière statistique, de « gommer » la dépendance aux conditions d'observations (présence plus ou moins forte de nuages, influence de l'humidité et des aérosols dans l'atmosphère, etc.) et de limiter les biais de mesure de manière générale.

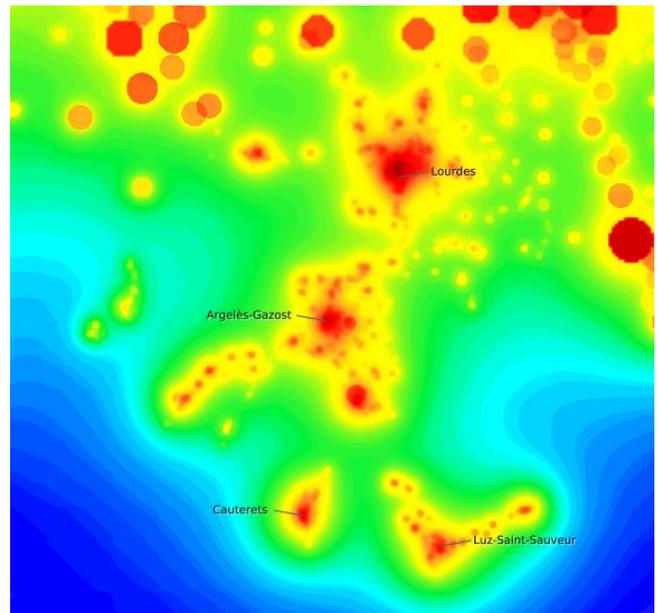
II. SIMULATION DE LA POLLUTION LUMINEUSE

La capacité à modéliser les effets de la pollution lumineuse constitue un prérequis essentiel pour mener à bien une politique d'adaptation des parcs d'éclairage efficace à la fois en termes environnementaux et économiques. La modélisation permet en effet de prédire les impacts positifs ou négatifs des décisions prises dans le cadre d'une modification des réseaux d'éclairage.

La plupart des simulations de la pollution lumineuse existantes utilisent des modèles heuristiques basés sur les populations ou bien des statistiques sur la nature des sols ou encore des données d'imagerie satellite (également entachées de biais de mesure). Très souvent, les cartes produites ne sont donc pas représentatives de la réalité du terrain en termes d'implantation des réseaux d'éclairage et d'intensité de la pollution lumineuse au sol. Pour remédier à ce problème, DarkSkyLab a développé un outil de simulation de la pollution lumineuse appelé **Otus**. Ce

logiciel prend en entrée des bases de données de sources lumineuses géolocalisées ainsi que leurs caractéristiques physiques. Chaque source discrète (associée par exemple à un lampadaire ou à un projecteur) est caractérisée en particulier par sa puissance et son **ULOR** (*Upward Light Output Ratio*, qui représente la fraction du flux lumineux d'un lampadaire émis au-dessus de l'horizontale). Du fait de l'utilisation de sources discrètes, le modèle implémenté dans Otus permet de produire des cartes qui sont beaucoup plus en conformité avec l'implantation réelle des réseaux d'éclairage.

A titre d'exemple, le résultat d'une simulation réalisée par Otus du territoire du *Pays de Lourdes et des Vallées des Gaves* (PLVG) est présenté ci-dessous. La zone d'étude comporte 118 agglomérations et 14 319 points lumineux. Comme on peut le voir sur la carte, seules les agglomérations de la zone d'étude sont simulées au niveau des sources discrètes alors que les agglomérations situées au Nord sont simulées à un niveau global en utilisant une heuristique basée sur les populations. Cette approche mixte permet de prendre en compte une large zone d'influence, bien au-delà de la zone d'étude pour laquelle les données détaillées sont disponibles (l'influence des grandes agglomérations peut en effet se faire sentir sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres).



Les couleurs utilisées dans la carte sont représentatives de l'indice de qualité du ciel (voir l'échelle de NSB fournie dans la première section de cet article). Elles vont du rouge foncé (emplacement les plus pollués) au blanc (lieux sans aucune pollution lumineuse) en passant successivement par le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le cyan, le bleu et le gris. Ainsi, si l'on se trouve par exemple à proximité immédiate de la ville de Lourdes, on sera situé dans une zone de couleur jaune typique d'un ciel de transition entre zone rurale et périurbaine. Dans une telle zone, la Voie lactée n'est discernable qu'en levant bien la tête et les détails vont en diminuant au fur et à mesure que le regard se porte vers l'horizon. La magnitude limite des étoiles visibles à l'œil nu dans un tel ciel est de l'ordre de 5 à 5,25.

On voit immédiatement sur cette carte que les prédictions

de qualité de ciel sont en adéquation avec la réalité de l'implantation des réseaux d'éclairage. Certaines agglomérations possèdent par exemple des hameaux éclairés qui changent totalement les profils de qualité de ciel dans certaines zones.

La mesure de la pollution lumineuse est couramment représentée à l'aide de l'échelle de Bortle¹. Le tableau suivant montre la correspondance entre les couleurs de l'échelle de Bortle et les couleurs utilisées par Otus dans les cartes produites. Les magnitudes limites approximatives visibles à l'œil nu sont indiquées² et on fournit à titre informatif le nombre d'étoiles qui seraient visibles pour la magnitude limite correspondante depuis un point d'observation situé à la latitude de Toulouse dans la nuit du 27 mars 2017 (au-dessus de 10° de hauteur et en étant protégé d'un éclairage direct)³ :

Couleur Bortle	Classe Bortle	Couleur Otus	Magnitude limite	# d'étoiles visibles	Voie Lactée
	1		≥ 7	> 6700	Spectaculaire
	2		≥ 6.5	> 3800	Très détaillée
	3		6	2170	Nombreux détails
			5.5	1180	Quelques détails
	4		5.25	950	Affaiblie à l'horizon
	4.5		5	660	Visible au zénith
	5		4.75	520	A peine visible
	6		4.5	340	Presque invisible
	7		4.25	220	Invisible
Blanc	8		4	190	Invisible
Blanc	9		≤ 3.5	≤ 90	Invisible

Il est important de vérifier que les résultats de simulation produits sont bien en conformité avec des mesures réalisées sur le terrain. On s'appuie pour cela sur les mesures réalisées avec le système Ninox pour vérifier qu'une bonne concordance est obtenue. Les mesures de NSB sont aussi utilisées pour ajuster les paramètres du modèle d'Otus et rendre le plus fiable possible les résultats des simulations.

III. APPLICATION – RESTAURATION DES TRAMES SOMBRES

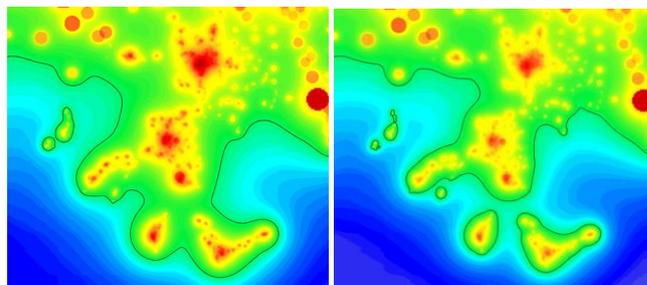
L'utilisation d'un modèle de simulation au niveau de sources lumineuses discrétisées permet d'anticiper les impacts positifs ou négatifs d'une modification d'un parc d'éclairage public ou d'un ensemble de mobiliers urbains éclairés. En effet, il suffit d'injecter dans le moteur de simulation différents scénarios en faisant varier la densité des points lumineux, leur puissance ou bien leur ULOR.

Cette capacité à prévoir les effets des modifications de l'éclairage public constitue un outil intéressant pour les collectivités dans la mesure où le concept de « **trames sombres** » est en train de prendre une importance croissante pour compléter la connaissance des continuités écologiques basées sur les trames vertes (terrestres) et bleues (aquatiques). La trame sombre peut être vue comme un réseau formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques auquel on ajoute la pression « lumière ». Il apparaît en effet clairement que l'identification et le respect de seuils limites en fonction de la sensibilité des espèces à la lumière

est une condition importante pour la protection de la biodiversité. La simulation va donc permettre d'identifier les zones à enjeux sur lesquelles des actions de conversion devront être menées en priorité pour restaurer la trame sombre.

Dans le cadre d'un projet de caractérisation des trames sombres sur le territoire du Parc National des Pyrénées et du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises, la simulation s'est avérée précieuse pour déterminer les zones d'exclusion écologique induites par la pollution lumineuse. Il a été ainsi possible de voir où les efforts devaient se concentrer dans le parc pour restaurer des couloirs de continuité écologique nécessaires aux différentes espèces étudiées (chiroptères et papillons de nuit).

A titre d'exemple, les deux cartes de la figure ci-dessous montrent l'influence qu'aurait une réduction de 30 % de la puissance lumineuse émise ainsi qu'une mise à zéro des ULOR des lampadaires de l'ensemble des communes du Pays de Lourdes et de la Vallée des Gaves sur le Parc national des Pyrénées. Une même valeur d'isocontour est représentée sur les cartes de manière à bien faire apparaître la création de couloirs plus sombres à plusieurs endroits du territoire.

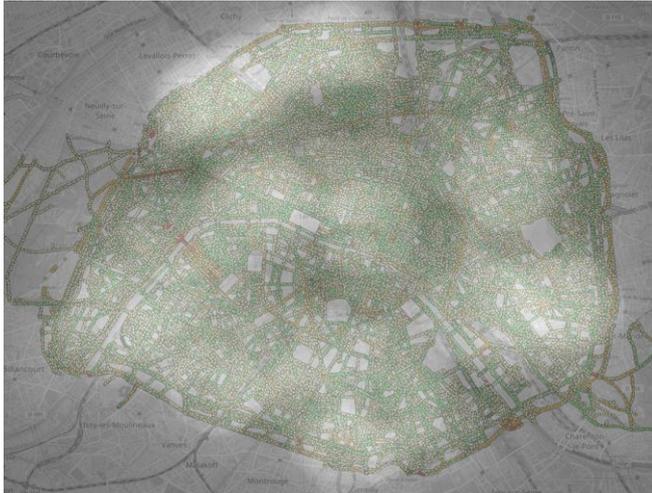


IV. APPLICATION – CONTRIBUTION DU MOBILIER URBAIN ÉCLAIRÉ À LA POLLUTION LUMINEUSE

DarkSkyLab a réalisé récemment une étude sur la contribution du mobilier urbain éclairé de la ville de Paris à la pollution lumineuse. Le site Paris Data met à disposition un grand nombre de jeux de données publiés par les services de la ville. Cela inclut en particulier les données d'éclairage public qui intègrent tous les dispositifs du parc d'éclairage géré par la ville, représentant 126 941 points lumineux auxquels sont associées des informations détaillées : type de dispositif, géolocalisation précise, type d'ampoule, puissance consommée, etc. L'existence de ces données permet de simuler de manière précise la pollution lumineuse induite par le parc d'éclairage grâce au logiciel Otus.

La carte ci-dessous montre le résultat d'une simulation du parc d'éclairage public de Paris. La présence d'une grande densité de sources à moyenne puissance dans certains quartiers, en particulier dans le 17^e arrondissement et dans les quartiers des Champs-Élysées, de Nation et d'Auteuil, induit des zones de pollution lumineuse comparativement plus importantes que dans d'autres quartiers de la capitale. Des zones comme les 10^e et 19^e arrondissements, Montmartre, Saint-Sulpice et le Marais semblent moins éclairées du fait de l'utilisation de lampadaires à plus basse puissance. On voit sur cette carte que la simulation au niveau des sources lumineuses discrètes permet de faire apparaître des différences significatives entre des zones d'une même agglomération. Les effets des changements dans les parcs d'éclairage

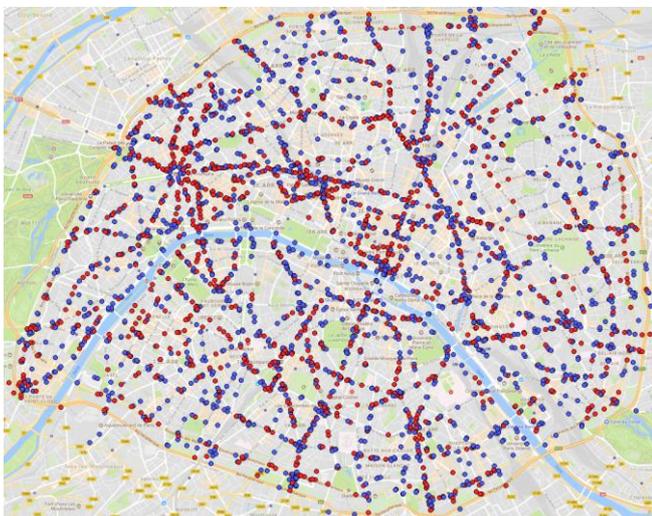
peuvent donc être anticipés à une échelle locale à l'aide de simulations.



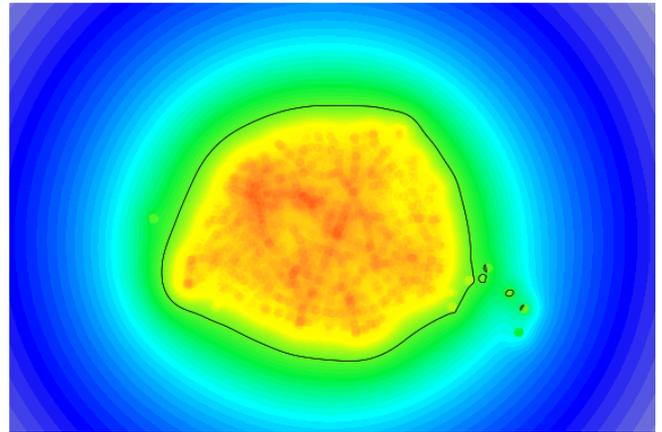
Outre les points lumineux de l'éclairage public, le jeu de données open Data de la ville de Paris intègre les dispositifs de mobilier urbain éclairé. Ces dispositifs sont de 3 types :

- Panneaux d'affichage municipal et publicitaire (code MUPI) sous forme de sucettes de 2 m² sur 2 faces (1 230 dispositifs) ;
- Abribus (code ABB) représentant 1 834 dispositifs ;
- Stations de taxi avec abri (code ABP) représentant 182 dispositifs.

La carte ci-dessus montre l'implantation de ces dispositifs dans Paris (les sucettes de 2m² sont représentées par des points rouges et les abribus et stations de taxi par des points bleus).



Une simulation incluant uniquement ces 3 246 dispositifs éclairés a été réalisée avec le logiciel Otus et la carte de pollution lumineuse résultante est présentée ci-dessous. Des hypothèses simplificatrices ont été utilisées concernant les caractéristiques des sources lumineuses associées : 90% de la puissance déclarée dans les données est utilisée pour l'éclairage, un ULOR de 50% est utilisé pour les panneaux de type MUPi et un ULOR de 28% est utilisé pour les abribus et les stations de taxi (en effet, un des côtés de l'affichage est couvert par le toit de l'abribus ou de la station).



Sur cette carte, un indice de qualité de ciel (et donc le niveau de pollution lumineuse) est représenté avec la même échelle de couleur que celle présentée plus haut dans cet article. On peut donc constater que l'éclairage du mobilier urbain (dispositifs utilisés en grande partie à des fins publicitaires) suffit à lui seul à « éteindre » le ciel de Paris. Si tout l'éclairage public de Paris hors mobilier urbain était éteint (ce qui constitue le contexte de cette simulation), la Voie lactée serait donc à peine visible depuis la plupart des rues de la capitale. Cette situation ne pourrait qu'empirer avec le déploiement massif de panneaux publicitaires lumineux à LED.

V. CONCLUSION

La capacité à prédire et à mesurer l'impact écologique, économique et environnemental de l'éclairage public et privé devient un enjeu important pour les collectivités territoriales. A ce titre, le développement d'outils de mesure et de simulation représente une étape importante pour que chacun puisse comprendre les conséquences de décisions liées aux réseaux d'éclairage et à d'autres dispositifs lumineux tels que le mobilier urbain éclairé.

- 1 Cette échelle a été définie dans l'édition de février 2001 du magazine *Sky & Telescope* par John Bortle. Voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Échelle_de_Bortle
- 2 Les magnitudes limites estimées présentées ici sont basées sur les travaux du *Light Pollution Science and Technology Institute* en Italie et pas sur les valeurs fournies dans l'article de Bortle qui semblent surestimées. Voir <http://www.inquinamentoluminoso.it/dmsp/starvis.html>
- 3 Simulation réalisée avec le logiciel C2A : <http://www.astrosurf.com/c2a/>