

Mesure et modélisation de la pollution lumineuse

Philippe Deverchère, Sébastien Vauclair, Michel Bonavitacola
DarkSkyLab

Mars 2018

I. RESUME

Il est maintenant avéré que la pollution lumineuse produite par l'éclairage artificiel a des effets néfastes sur la santé humaine et plus généralement sur les écosystèmes. A ce titre, l'étude de la pollution lumineuse connaît un essor important^{1,2} avec des besoins spécifiques en termes de métrologie et de simulation. Depuis plusieurs années, le bureau d'étude DarkSkyLab délivre des prestations d'expertise technique et scientifique dans le domaine de la pollution lumineuse et de ses impacts sur les écosystèmes : diagnostics d'éclairage public, préconisations techniques pour limiter les effets délétères de la pollution lumineuse, modélisation cartographique au niveau des sources lumineuses discrètes, études d'impact écologique, etc. Dans ce cadre, DarkSkyLab entreprend aussi ses propres activités de recherche et développement et a en particulier mis au point deux outils innovants : une plateforme automatisée de mesure de la pollution lumineuse et un logiciel de simulation qui s'appuie des données détaillées des parcs d'éclairage et qui permet de prédire les niveaux de pollution lumineuse sur un territoire. Comme cela est montré dans l'article, ces outils et méthodes s'appliquent aussi bien à des études de biodiversité en milieu rural avec le concept de trames sombres (ou trames noires, ou trames nocturnes) qu'à des projets d'urbanisme où les sources de pollution lumineuses peuvent être multiples et complexes. Une comparaison succincte des différents modèles utilisés pour la prédiction de la pollution lumineuse est présentée dans l'article et le problème spécifique de la prise en compte de la couverture nuageuse est évoqué.

La pollution lumineuse est produite essentiellement par l'éclairage public et industriel et dans une moindre mesure par l'éclairage résidentiel privé. Cette lumière artificielle peut être émise directement vers le ciel par les sources lumineuses, ou bien être réfléchi par les terrains et bâtiments environnants (avec un albédo plus ou moins élevé en fonction de leur nature). La lumière est ensuite diffusée par les molécules de gaz de l'atmosphère et par les aérosols en suspension (poussières, molécules complexes, etc.)³. Cette diffusion de la lumière est à l'origine de la formation de halos lumineux au-dessus des agglomérations, halos qui peuvent être visibles à de grandes distances. L'effet le plus notable de ces halos est l'extinction du ciel nocturne, provoquant par exemple une diminution importante du nombre d'étoiles visibles à l'œil nu. Ainsi, on estime qu'un tiers de l'humanité ne peut plus voir la Voie lactée (dont 80 % des nord-Américains et 60 % des européens)⁴ du fait de la présence de pollution lumineuse. D'autres effets sont plus insidieux et l'on peut citer par exemple les impacts sur le déplacement des espèces nocturnes et la migration des oiseaux, la perturbation du cycle de reproduction des végétaux, une surmortalité de certaines espèces d'insectes ou bien des effets négatifs sur la santé des riverains qui subissent un éclairage nocturne excessif. Toutes ces raisons font que l'étude de la pollution lumineuse devient un sujet de recherche scientifique actif au niveau international^{5,6,7}.

II. METROLOGIE DE LA POLLUTION LUMINEUSE

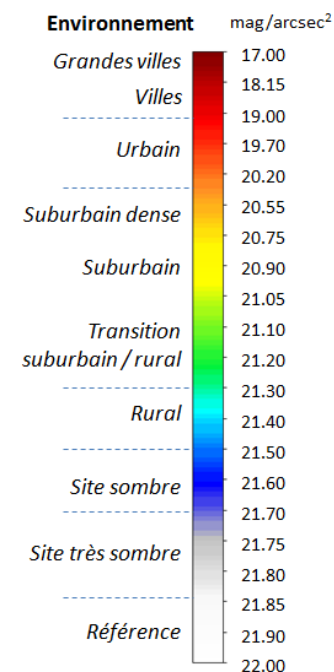
La capacité à mesurer la brillance du fond de ciel nocturne constitue un prérequis fondamental pour mener à bien une étude sérieuse de la pollution lumineuse. De plus, ces mesures doivent être réalisées dans des environnements variés, depuis le sommet d'une montagne isolée jusqu'à des environnements 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 d'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 traditionnellement au moyen d'un **SQM** (*Sky Quality Meter*) et elle est exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$). Cette unité est celle d'une luminance et il

s'agit 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 dans la zone de faibles brillances de ciel (sites sombres) que dans la zone de fortes brillances (ciels pollués).



L'approche traditionnelle consistant à utiliser un SQM à bout de bras pour réaliser des mesures individuelles de NSB 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, DarkSkyLab a développé une plateforme appelée **Ninox** pour mesurer la brillance du fond de ciel nocturne de manière systématique et sur des périodes longues. La plateforme Ninox opère de manière autonome et continue sans qu'aucune intervention ne soit nécessaire de la part d'un opérateur ni qu'une connexion Internet ne soit requise. 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 dans les Hautes-Pyrénées.



À titre d'exemple, la *figure 1* 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.

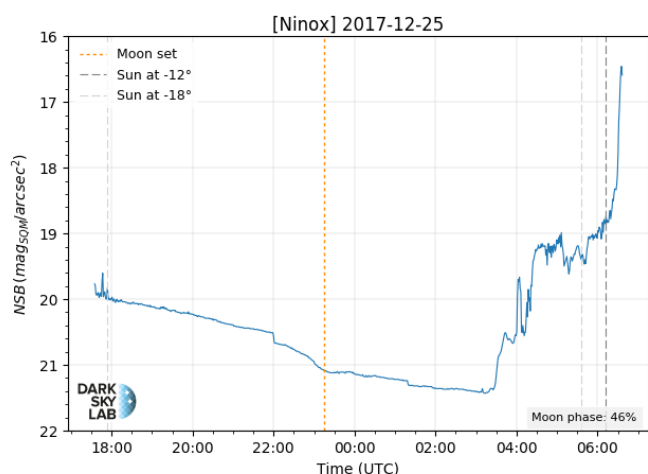


Figure 1 – Acquisition Ninox sur une nuit

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.

La *figure 2* montre un diagramme de densité produit à partir de mesures de NSB collectées par un système Ninox sur une durée de 44 nuits dans le centre de Toulouse en janvier et février 2018 (35 545 mesures réalisées avec une fréquence de 1 minute). Il est facile de constater sur ce diagramme de densité que l'environnement est fortement pollué avec un NSB au mieux de 19,15 et un fort écart entre la zone de densité de ciel clair (en bas du diagramme) et celle de ciel couvert (en haut du diagramme). Les points les plus bas correspondent à une situation où de la neige recouvrait le hublot de Ninox.

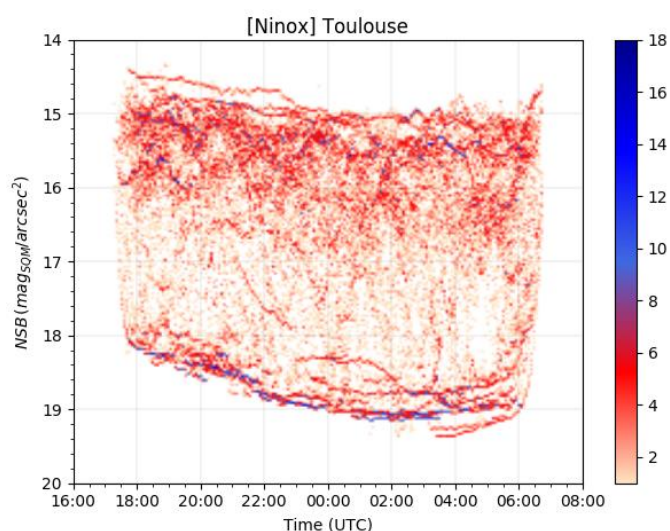


Figure 2 – Diagramme de densité de NSB

Lorsque l'on dispose de données qui couvrent des durées relativement longues (plusieurs mois ou plusieurs années), il est alors aisé avec cette approche de mettre en évidence des phénomènes variés. Les figures ci-dessous présentent par exemple une analyse de la contribution de la Voie lactée à la brillance du fond de ciel. Pour réaliser ces diagrammes de densité, les données SQM mises à disposition par l'Institut

Für Astronomie de Vienne en Autriche ont été utilisées⁸. Il s'agit d'un jeu de données collectées en continu sur 5 ans dans un environnement relativement sombre.

Les figures 3 et 4 présentent les diagrammes de densité obtenus à partir de ce jeu de données filtré selon la présence ou non de la Voie lactée au zénith. Sur la figure 3 la Voie lactée était présente au zénith au moment des mesures et sur la figure 4 elle en était éloignée. La comparaison de ces deux diagrammes permet de se rendre compte aisément de la différence de luminosité mesurée.

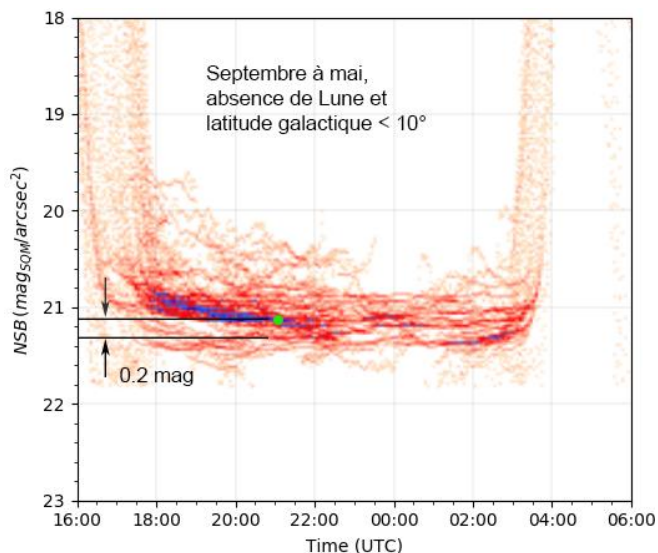


Figure 3 – Diagramme de densité pour les mesures avec une latitude galactique du zénith inférieure à 10°

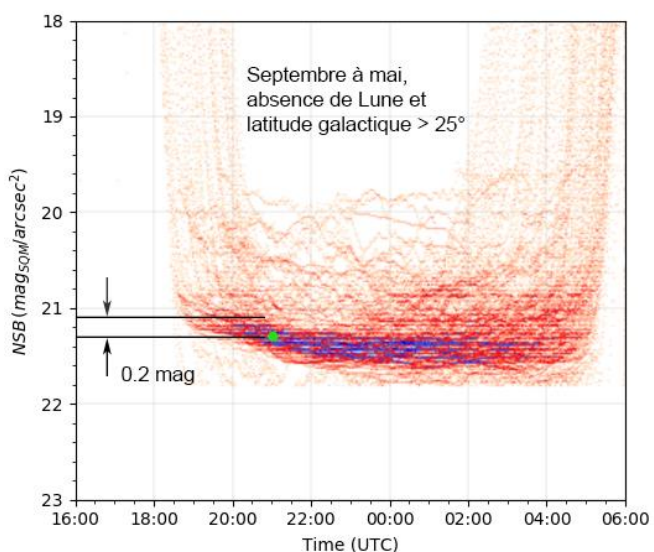


Figure 4 – Diagramme de densité pour les mesures avec une latitude galactique du zénith supérieure à 10°

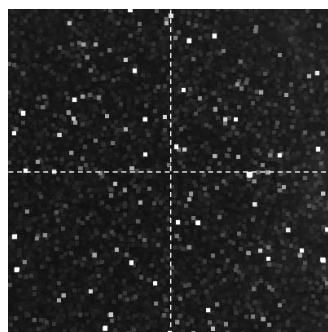
Les points de plus haute densité à 21 heures TU sur les deux diagrammes (en vert sur les figures) ont des valeurs de NSB respectivement de 21,14 (présence de la Voie lactée) et 21,32 (absence de la Voie lactée). On peut donc constater qu'il existe un écart de 0,2 magnitudes environ, ce qui représente la contribution de la Voie lactée à la brillance du fond de ciel. Cette valeur est compatible avec les estimations qui sont couramment réalisées avec des SQM manuels, mais il faut noter qu'elle est plus faible que des valeurs que l'on trouve dans certains articles⁹.

Cet exemple montre tout l'intérêt que représente

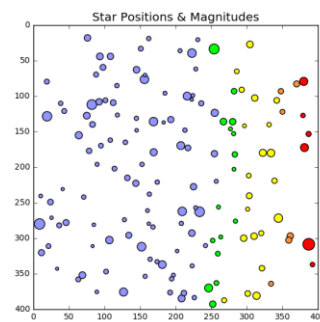
l'accumulation d'un grand nombre de mesures SQM plutôt que de se baser sur des mesures individuelles réalisées manuellement. Cette façon de caractériser la pollution lumineuse (ainsi que la contribution de phénomènes naturels tels que le passage de la Voie lactée) en utilisant une approche statistique des relevés SQM semble se développer dans les publications scientifiques depuis quelques années^{10,11}.

Même réalisée de manière continue, l'acquisition de la luminosité du fond de ciel à l'aide d'un SQM présente toutefois l'inconvénient de ne mesurer qu'une petite partie du ciel, typiquement une zone de 20° vers le zénith. Il serait possible d'automatiser le pointage automatique du SQM vers différentes zones de la voûte céleste, mais cette approche est laborieuse et difficile à mettre en œuvre sur de longues durées. Pour adresser cette problématique, DarkSkyLab a développé un instrument appelé **Scops** qui, une fois couplé à Ninox, permet de quantifier la luminosité du fond de ciel sur une grande partie de la voûte céleste.

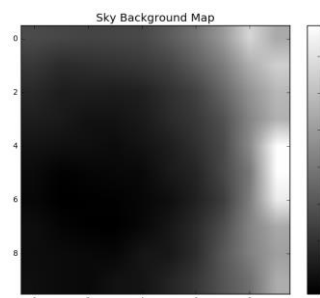
Le système Scops est constitué d'une caméra CCD refroidie, d'un objectif fish-eye et d'un nano-ordinateur embarqué qui réalise des images « all-sky » de la voûte céleste de manière continue. Le processus automatique d'acquisition des images et de traitement est le suivant :



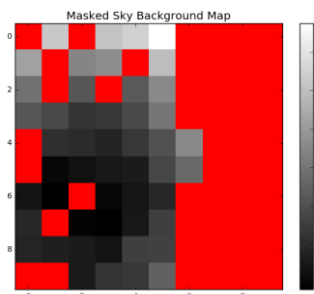
Par ciel clair et en absence de Lune, une image all-sky est acquise toutes les 15 minutes. L'image est recadrée et l'on ne garde que la partie centrale de manière à éliminer les zones trop déformées de l'image près de l'horizon.



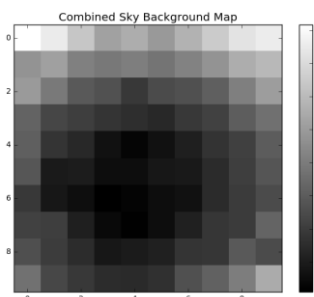
Une résolution astrométrique de l'image est réalisée de manière à déterminer la latitude galactique de toutes les étoiles de l'image. Sur la vue ci-contre, les étoiles en rouge sont au plus proche de la ligne centrale de la Voie lactée et les étoiles en bleu sont à plus de 20° de latitude galactique.



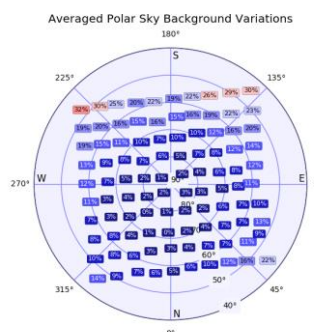
La carte de luminosité du fond de ciel est produite à partir de l'image initiale à l'aide d'un traitement qui élimine les étoiles du champ. On voit sur la figure ci-contre que la luminosité est plus forte sur la droite de l'image là où se situe la Voie lactée.



L'image est découpée en zones et on élimine celles qui n'ont pas un rapport signal sur bruit suffisant ou qui sont situées à proximité ou dans la Voie lactée. Ces zones éliminées sont représentées en rouge sur la figure.



A la fin de la nuit, toutes les mesures valides sur les différentes zones sont combinées pour produire une carte de luminosité du fond de ciel résultante. On voit sur cet exemple que la Voie lactée n'apparaît plus sur l'image. Cette dernière s'est déplacée au cours de la nuit et la carte peut ainsi être complétée entièrement.



A l'issue de la nuit, les variations relatives de luminosité du fond de ciel sont calculées à l'aide de la carte résultante. La connaissance des mesures de brillance de fond de ciel réalisées par Ninox au zénith durant la même nuit permet de calibrer cette carte et d'estimer le niveau de pollution lumineuse en mag/arcsec² à un endroit arbitraire en azimut et en hauteur sur la zone couverte.

Cette approche combinée Scops / Ninox n'est bien sûr utilisable que lors des nuits claires et elle ne prend pas en compte une éventuelle variation des halos de pollution lumineuse à différents azimuts au cours de la nuit (il faut noter toutefois que les halos des grandes agglomérations varient relativement peu). Elle constitue malgré tout une approche intéressante pour mieux caractériser la pollution lumineuse d'un site que l'on souhaite étudier en détail.

III. SIMULATION DE LA POLLUTION LUMINEUSE

On assiste depuis quelques années à une prise de conscience de la part des pouvoirs publics des effets négatifs de la pollution lumineuse, que ce soit d'un point de vue économique (charges de fonctionnement et gaspillage énergétique) ou environnemental (effets délétères sur les espèces et la santé humaine). Cela se traduit par une volonté de mieux adapter les parcs d'éclairage aux besoins des populations et de sensibiliser ces dernières aux enjeux économiques et environnementaux. La capacité à modéliser les effets de la pollution lumineuse constitue un prérequis essentiel pour mener à bien une telle politique. La modélisation permet en effet de prédire les impacts positifs ou négatifs des décisions prises dans le cadre d'une modification des parcs d'éclairage.

Pour répondre à cette demande, 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). 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 (qui sont 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. Du fait de l'utilisation de sources discrètes, le modèle implémenté dans Otus permet quant à lui 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 dans le reste de cet article) est présenté en figure 5. 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).

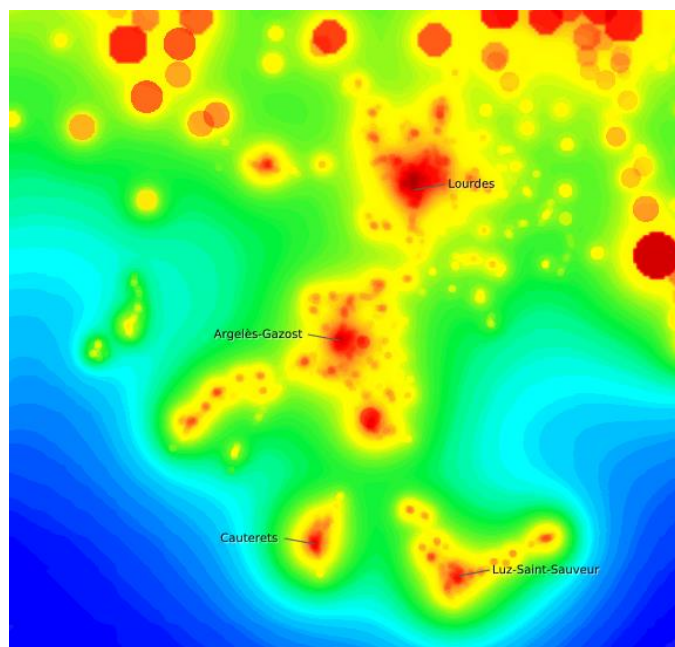


Figure 5 – Simulation Otus de la pollution lumineuse du Pays de Lourdes et des Vallées des Gaves

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 Bortle¹². 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 indiquées¹³ 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)¹⁴ :

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
	4		5.5	1180	Quelques détails
	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 par le logiciel Otus sont bien en conformité avec des mesures réalisées sur le terrain. Pour cela, DarkSkyLab s'appuie 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.

IV. 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 Otus 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** »¹⁵ 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 » de la pollution lumineuse. Il apparaît en effet de plus en plus 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.

Le bureau d'étude DarkSkyLab a ainsi conduit une étude de caractérisation des trames sombres sur le territoire du Parc National des Pyrénées et du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises. Dans le cadre de ce projet, la simulation s'est avérée précieuse pour déterminer les zones d'exclusion écologique induites par la pollution lumineuse et voir ainsi où les efforts devaient se concentrer pour restaurer des couloirs de continuité écologique nécessaires aux différentes espèces étudiées.

Pour illustrer ce point, les deux cartes de la *figure 6* montrent l'influence globale 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 des Vallée des Gaves. 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.

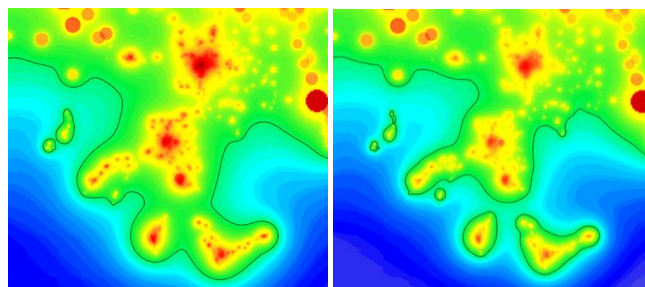


Figure 6 – Réduction de 30% de la puissance émise et mise à zéro des ULOR

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

L'étude des impacts de la pollution lumineuse ne se limite pas aux seules zones rurales ou aux parcs nationaux et régionaux. Les grandes agglomérations produisent un éclairage artificiel intense dont les effets se font ressentir sur de grandes distances. De plus, les effets délétères d'une exposition à la lumière artificielle sur la santé humaine commencent maintenant à être reconnus¹⁶, et il est donc important de développer une bonne capacité à modéliser la pollution lumineuse dans des zones très exposées.

A titre d'exemple, 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 de la *figure 7* montre le résultat d'une simulation du parc d'éclairage public de Paris et fait apparaître les variations relatives dans les différents quartiers de la capitale. 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.

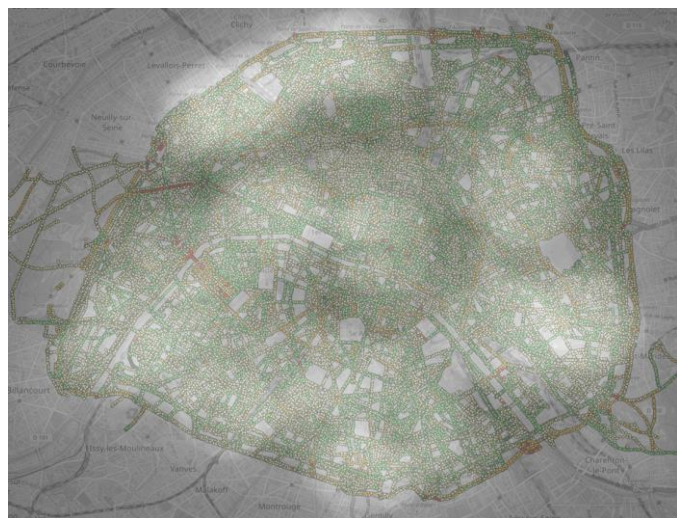


Figure 7 – Simulation des variations relatives de pollution lumineuse produite par l'éclairage public de la ville de Paris

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 de la *figure 8* 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).

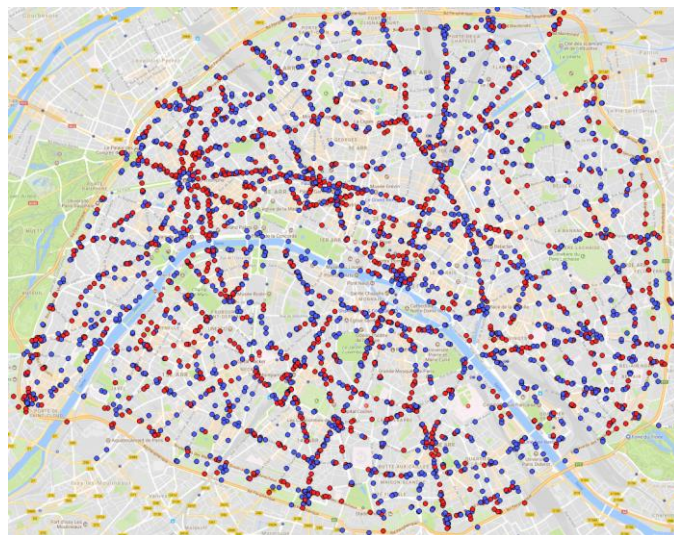


Figure 8 – Distribution du mobilier urbain éclairé à Paris

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 en *figure 9*. 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).

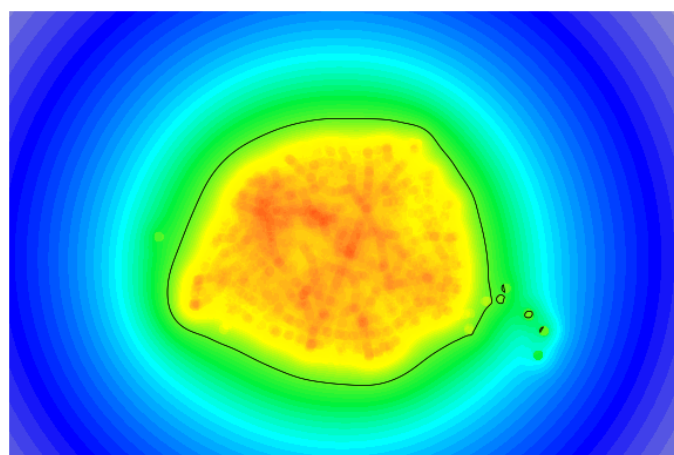


Figure 9 – Simulation de la pollution lumineuse produite par le mobilier urbain éclairé sur la ville de Paris

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, un cas de figure qui a malheureusement de grandes chances de se produire.

VI. COMPARAISON DES METHODES DE MODELISATION

Au regard des enjeux environnementaux, économiques et de santé publique, il devient clair que le problème de la pollution lumineuse nécessite d'être rapidement et sérieusement pris en compte sur le plan scientifique. A ce titre, le développement de modèles permettant de prédire avec un bon niveau de fiabilité la luminosité du ciel en un endroit donné devient crucial.

Il existe à ce jour quatre grandes classes de modèles permettant de réaliser des prédictions de qualité de ciel :

1. Utilisation d'images satellites haute résolution¹⁷ ;
2. Modèles à base d'heuristiques sur les populations des villes¹⁸ ;
3. Modèles à base d'heuristiques sur la nature des sols¹⁹ ;
4. Modèles basés sur la connaissance des sources lumineuses discrètes²⁰.

Il est bien sûr possible de combiner certains de ces modèles afin d'obtenir des résultats plus précis. Le tableau ci-dessous résume de manière succincte les avantages et inconvénients de chacune de ces approches selon les 3 axes souvent utilisés dans l'étude de la pollution lumineuse : l'axe **spatial** (résolution des cartes et respect de l'implantation des réseaux d'éclairage), l'axe **temporel** (variabilité nocturne, extinctions, évolution des réseaux sur le moyen et long terme) et l'axe **spectral** (spectre des flux lumineux induisant la pollution lumineuse).

	Axe spatial	Axe temporel	Axe spectral
Images satellite	++ Bonne topologie d'éclairage non limitée à l'éclairage public	-- Impossibilité de réaliser des relevés fréquents ou à différentes heures de la nuit	~ Limitations dues aux bandes spectrales utilisées
Heuristique sur les populations	-- Très mauvaise prise en compte de la topologie d'éclairage	~ Prise en compte limitée des données d'extinction	- Pas réellement d'heuristiques disponibles sur la nature spectrale de la pollution
Heuristiques sur la nature des sols	~ Assez bonne prise en compte de la topologie d'éclairage	- Prise en compte limitée de la variabilité temporelle	- Pas réellement d'heuristiques disponibles sur la nature spectrale de la pollution
Sources lumineuses discrètes	++ Très bonne prise en compte des topologies d'éclairage ~ Nécessite des bases de données détaillées y compris pour l'éclairage privé	+ Bonne prise en compte des données d'extinction en utilisant les bases de données municipales	+ Connaissance des lampes utilisées au niveau des points lumineux

Les cartes de pollution lumineuse publiées récemment dans le cadre du *New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness* montrent clairement l'intérêt des modèles basés sur des données satellites. Toutefois, cette approche présente l'inconvénient de ne pas pouvoir prendre en compte la variabilité temporelle de la pollution lumineuse, que ce soit au cours de la nuit ou bien sur des courtes ou des moyennes durées. De plus, les images VIIRS DNB utilisées aujourd'hui dans l'étude sont fortement filtrées dans la partie bleue du spectre, ce qui est problématique eu égard à la ten-

dance actuelle de conversion massive de l'éclairage public et privé vers des technologies LED. Les LED émettent en effet une lumière avec une forte composante bleue et, à éclairage égal, accentuent donc la pression sur l'environnement.

Les modèles basés sur l'utilisation de sources lumineuses discrètes géolocalisées présentent plusieurs avantages tels que le respect de la topologie d'implantation des réseaux d'éclairage ou bien la connaissance détaillée des lampes utilisées (ce qui permet de dériver des informations sur le spectre des halos de pollution lumineuse). De plus, l'accès aux bases de données détaillées des parcs d'éclairage s'accompagne généralement d'une bonne connaissance des pratiques d'extinction et de diminution d'intensité. Cela permet d'estimer plus finement la pollution lumineuse à différentes heures de la nuit et de visualiser les effets de différents scénarii de gestion envisagés.

Le plus gros inconvénient de cette approche reste malgré tout la mise à disposition par les communes et les syndicats départementaux d'énergie des bases de données d'éclairage public. Dans certains cas, rares heureusement, les bases de données géolocalisées exploitables n'existent tout simplement pas. Etant donné la prise de conscience des impacts de la pollution lumineuse sur les écosystèmes, on peut espérer que les collectivités territoriales vont évoluer et mieux maintenir et partager à l'avenir les données publiques concernant l'éclairage public. Il est bien sûr toujours possible de réaliser des relevés des sources lumineuses sur le terrain et DarkSkyLab a entrepris le développement d'un instrument dédié, appelé **Bubo**, qui vise à simplifier et accélérer ce travail fastidieux.

VII. LE PROBLEME DE LA COUVERTURE NUAGEUSE

Lorsque l'on parle de pollution lumineuse, il est courant de se focaliser uniquement sur des estimations de NSB par ciel clair. Cette tendance peut probablement être expliquée par le fait qu'initialement ce sont les astronomes qui se sont principalement intéressés à la mesure de la pollution lumineuse. Cette approche apparaît aujourd'hui extrêmement réductrice à plusieurs titres. Tout d'abord, la présence de nuages amplifie fortement les halos de pollution lumineuse à proximité et dans les agglomérations. Il n'est pas rare en particulier de constater une amplification d'un facteur 10 ou plus des niveaux de luminosité de fond de ciel dans les grandes villes en présence de nuages ou de brouillard. De plus, les impacts écologiques de la pollution lumineuse sont maintenant avérés et leur amplification par les nuages induit des effets encore mal connus (et probablement largement sous-estimés) sur les espèces animales et végétales.

Le logiciel Otus développé par DarkSkyLab possède une fonction qui permet de produire une carte de pollution lumineuse prenant en compte la présence d'une couverture nuageuse (ciel couvert à plus de 95%). Cet accroissement est calculé en se basant sur la corrélation mesurée entre les brillances obtenues par ciel clair et celles obtenues par ciel couvert et ce sur des sites plus ou moins impactés par la pollution lumineuse²¹. Il est en effet essentiel de faire des mesures dans des lieux variés étant donné que l'accroissement de brillance du fond de ciel par ciel couvert est d'autant plus

important que le site est pollué. Au contraire, sur des sites peu pollués, la présence de nuages peut assombrir un peu plus le ciel.

La carte de la *figure 10* montre le résultat d'une simulation Otus du PLVG dans le cas d'un ciel clair et celle de la *figure 11* montre la même zone mais simulée cette fois-ci par ciel couvert.

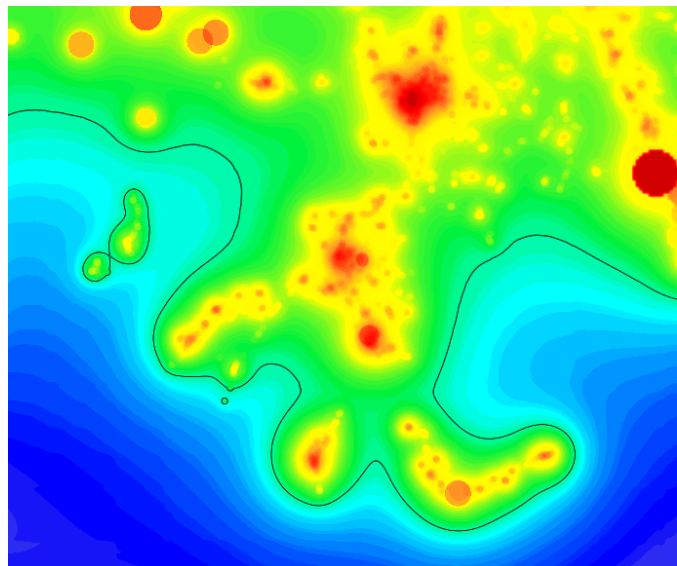


Figure 10 – Simulation du territoire du Pays de Lourdes et des Vallées des Gaves (PLVG) avec un ciel clair

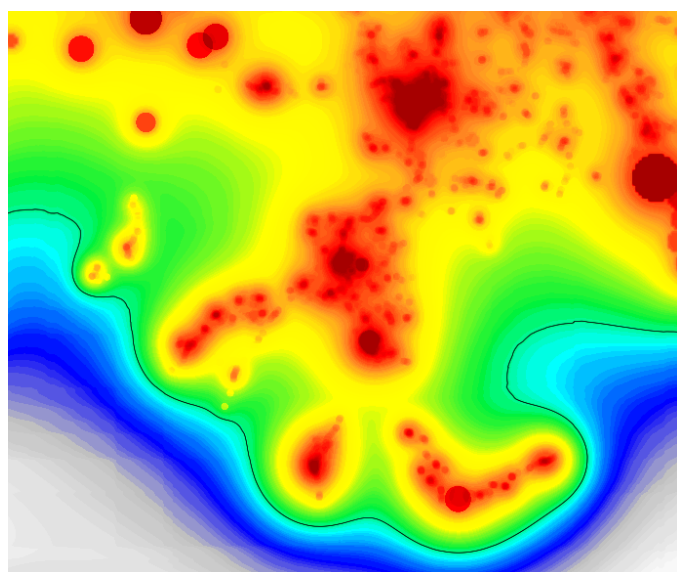


Figure 11 – Simulation du PLVG par ciel couvert

La différence est frappante, et, comme attendu, la présence de nuages provoque un fort accroissement des niveaux de NSB à proximité des agglomérations. Les zones qui étaient déjà sombres dans la simulation par ciel clair, quant à elles, deviennent encore plus sombres avec la présence des nuages.

VIII. 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.

Les mesures et les simulations réalisées par DarkSkyLab montrent qu'il est primordial de prendre en compte la couverture nuageuse pour caractériser un site et évaluer correctement les impacts environnementaux de la pollution lumineuse.

IX. REFERENCES

- 1 Voir la base de données sur les publications ayant trait à la pollution lumineuse sur le site de l'International Dark-Sky Association (<http://www.darksky.org/resources/research/alan-database/>)
- 2 Voir "Sauver la nuit" : empreinte lumineuse, urbanisme et gouvernance des territoires, Samuel Challéat
- 3 *Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility*, Aubé et al.
- 4 Voir *The new world atlas of artificial night sky brightness* sur <http://advances.sciencemag.org/content/2/6/e1600377>
- 5 Voir les travaux du Collectif RENOIR sur <http://renoir.hypotheses.org/>
- 6 Voir les travaux de Pierantonio Cinzano sur <http://www.lightpollution.it/indexen.html>
- 7 Voir les travaux de Martin Aubé sur <http://cegepshebrooke.qc.ca/~aubema/index.php/Prof/Page>
- 8 Ces données détaillées sont librement accessibles sur <https://www.univie.ac.at/nightsky/sqm/lv.php>
- 9 L'article *Optical Sky Brightness and Transparency during the Winter Season at Dome A Antarctica from the Gattini-Allsky Camera*, Yi Yang et al, mentionne une valeur approximative de 0,5 mag/arcsec², mais les observations sont réalisées en Antarctique durant l'hiver austral avec la Voie lactée beaucoup plus brillante de l'hémisphère Sud.
- 10 Voir *Night sky photometry and spectroscopy performed at the Vienna University Observatory*, Johannes Puschnig, Thomas Posch, Stefan Uttenthaler
- 11 Voir *Worldwide variations in artificial skyglow*, Christopher C. M. Kyba et al.
- 12 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
- 13 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>
- 14 Simulation réalisée avec le logiciel C2A : <http://www.astrosurf.com/c2a/>
- 15 Voir *Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ?*, Romain Sordello
- 16 Voir par exemple *Make lighting healthier* dans la revue *Nature* du 18 janvier 2018.
- 17 Voir par exemple *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Fabio Falchi et al.
- 18 Modèles qui utilisent en particulier la loi de Walker, Voir *The effects of urban lighting on the brightness of the night sky*, Walker, M. F., *Astronomical Society of the Pacific, Publications*, vol. 89, June-July 1977, p. 405-409.
- 19 Voir https://www.avex-asso.org/dossiers/wordpress/fr_FR/la-pollution-lumineuse-light-pollution
- 20 Avec en particulier le modèle implémenté dans le logiciel Otus de DarkSkyLab comme décrit dans cet article.
- 21 Voir par exemple les corrélations documentées dans l'article *Worldwide variations in artificial skyglow*, Kiba et al.