

Les différentes approches de la cartographie de la pollution lumineuse

Philippe Deverchère¹, Sébastien Vauclair¹, Bastien Nguyen Duy – Bardakji²

¹ *DarkSkyLab, 3 rue Romiguières 31000 Toulouse, France*

Tél: +33 6 42 44 81 60

Courriels: philippe@darkskylab.com, sebastien@darkskylab.com

² *La TeleScop, 311 chemin de la Draye du Marbre 34170 Castelnau le lez*

Courriel : bastien.nguyen@latelescop.fr

Préambule

Cette note fait suite au travail collaboratif de réflexion préliminaire sur les indicateurs nationaux de pollution lumineuse. La conclusion du rapport¹ remis par l'UMS Patrinat (MNHN) à l'**Observatoire national de la biodiversité (ONB)** insiste sur la nécessité d'une bonne connaissance de l'indicateur de pression que constitue l'éclairage nocturne, à grande échelle et avec une bonne résolution spatiale. Pour cela une bonne maîtrise des données initiales est nécessaire. La disponibilité immédiate des données issues des campagnes de mesures depuis l'espace (détecteur VIIRS – NASA DSMP) est un argument évident en faveur de ce type de données ; cependant un certain nombre de biais inhérent à la collecte de ces données incite à la prudence lorsqu'il s'agit de convertir directement les données de radiance collectées depuis l'espace en indicateur de pollution lumineuse (du fait de la sensibilité spectrale, des horaires de passage des satellites, etc.). Une autre source de données apporte un niveau de précision supérieur pour la réalisation de cartes de pollution lumineuse, il s'agit des données géoréférencées des parcs d'éclairage public. Si ces données ne sont pas encore disponibles à l'échelle du pays, la compétence éclairage public est souvent au niveau des départements et les bases de données SIG à ces échelles sont de plus en plus complètes et accessibles. L'objectif de cette note est de proposer une méthode pour réaliser des cartes de pollution lumineuse par la modélisation de la diffusion de la lumière dans l'atmosphère, ceci en intégrant les différents jeux de données disponibles et tirer profit de leur complémentarité, pour ainsi extraire un indicateur national robuste.

Introduction

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 et à représenter les effets de la pollution lumineuse constitue un prérequis essentiel pour mener à bien une telle politique. La modélisation, puis la représentation sous forme de cartes, des niveaux de pollution lumineuse permet en effet de prédire les impacts positifs ou négatifs des décisions prises dans le cadre d'une modification des parcs d'éclairage. Ces données cartographiques de prédiction de la pollution lumineuse peuvent être combinées dans un système d'information géographique avec des données traditionnellement utilisées en écologie (zones à protéger, continuités écologiques terrestres et aquatiques, etc.). Cela permet de définir le concept de « trames sombres » qui prend en ce moment une importance croissante afin de compléter la connaissance des continuités écologiques². 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.

Il est possible de différencier les différents modèles de prédiction de qualité ciel à partir des données sources qu'ils utilisent. Les principales sources de données utilisées sont les suivantes :

- Images satellites basse résolution mesurant la radiance³ ;
- Bases de données géolocalisées des agglomérations avec connaissance des populations. Les modèles qui utilisent ces données sont en général basés sur la loi de Walker⁴ ;
- Statistiques détaillées sur la nature des sols (tissu urbain, sol artificialisé, prairies, espaces boisés, etc.)⁵ ;
- Sources lumineuses discrètes géolocalisées⁶.

Il est bien sûr possible de combiner certaines de ces sources de données afin d'obtenir des résultats plus précis. Le tableau ci-dessous présente de manière succincte les avantages et inconvénients associés à l'utilisation de chacune de ces sources de donnée selon 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 (radiance)	 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
Agglomérations avec 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
Données 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 géolocalisées	 Très bonne prise en compte des topologies d'éclairage	 Bonne prise en compte des données d'extinction en utilisant les bases de données municipales	 Connaissance des lampes utilisées au niveau des points lumineux
	 Nécessite des bases de données détaillées y compris pour l'éclairage privé		

La plupart des logiciels qui permettent de produire des cartes prédictives de pollution lumineuse s'appuient sur un type de données unique et utilisent ensuite un modèle spécifique pour inférer les niveaux de pollution lumineuse sur un territoire. Les modèles utilisés peuvent être sophistiqués et faire intervenir de nombreux paramètres et

phénomènes physiques : qualité spectrale de la lumière, diffusion de Raleigh et de Mie, caractéristiques physiques des sources lumineuses, heuristiques variées basées sur les populations ou des statistiques d'éclairage en fonction de la nature des sols, masquage par les reliefs, etc.

Selon son contexte et ses objectifs, une étude de pollution lumineuse sur un territoire pourra tirer bénéfice de l'utilisation d'une source de données ou d'une autre. Une étude détaillée à un niveau local nécessitera par exemple la connaissance des sources lumineuse discrètes alors qu'une étude à l'échelle d'un parc naturel avec un bon respect des topologies d'éclairage pourra s'appuyer sur des cartes de radiance satellite.

Logiciel de simulation de la pollution lumineuse Otus

Pour répondre à ces différents cas de figure, le bureau d'étude DarkSkyLab a développé un outil de simulation de la pollution lumineuse appelé **Otus** qui est capable de prendre en compte plusieurs types de sources de données. Le tableau suivant résume les sources de données utilisables par Otus et décrit comment elles permettent d'adresser différentes problématiques : taille des territoires modélisés, modélisation de la couverture nuageuse, gestion des extinctions, etc.

Source de données	Utilisation	Résolution	Taille des territoires	Couverture nuageuse	Gestion des extinctions
P Base de données des agglomérations avec leurs populations	<ul style="list-style-type: none"> • Cartes de pollution lumineuse très globales sans nécessité de respect de la topologie des réseaux d'éclairage • Prise en compte des effets à longue distance de la pollution lumineuse 	Très faible (utilisation d'un modèle à symétrie sphérique)	Territoires très large (à l'échelle d'un pays ou d'un continent)	Oui, mais avec un faible respect de la topologie des agglomérations	Oui, mais uniquement au niveau très global des agglomérations
S Données de radiance satellites VIIRS-DNB	<ul style="list-style-type: none"> • Cartes de pollution lumineuses détaillées là où les données sur les sources lumineuses discrètes ne sont pas disponibles 	Intermédiaire (de l'ordre du kilomètre)	Territoires jusqu'à l'échelle d'un pays	Oui, avec un très bon respect des topologies d'éclairage	Oui, avec un bon niveau d'ajustement au niveau de zones géographiques
D Sources discrètes géolocalisées (associées par exemple à des lampadaires ou à des projecteurs) et caractérisées en particulier par leur puissance et leur ULOR ^a	<ul style="list-style-type: none"> • Cartes de pollution lumineuses très détaillées quand les données sont disponibles 	Très élevée (de l'ordre de la dizaine de mètres)	Territoires jusqu'à l'échelle d'une région (parcs naturels régionaux, parcs nationaux)	Oui, avec un très bon respect des topologies d'éclairage	Oui, avec un niveau très bas d'ajustement (par exemple au niveau d'une rue)

^a *Upward Light Output Ratio*, qui représente la fraction du flux lumineux d'un lampadaire émis au-dessus de l'horizontale

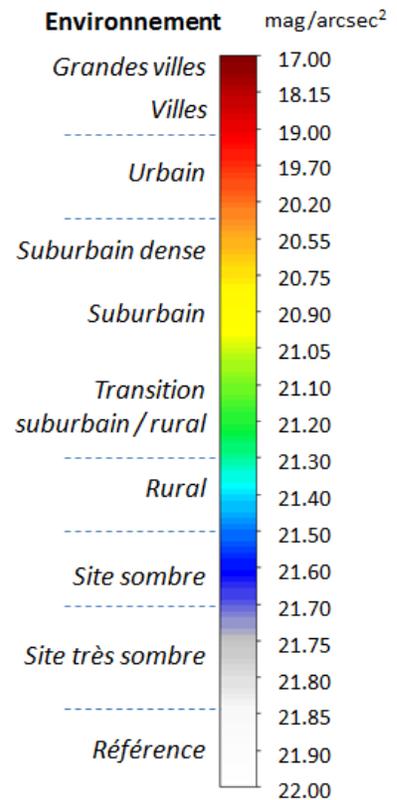
La valeur ajoutée du logiciel de simulation de la pollution lumineuse Otus réside dans sa capacité à s'adapter aux données disponibles et aux objectifs spécifiques des études menées. Une étude dans le cadre de la constitution d'une réserve internationale de ciel étoilé (RICE) nécessitera par exemple une connaissance détaillée de toutes les sources lumineuses du territoire (puissance, ULOR et type de lampe) et utilisera aussi la base de données des agglomérations avec leurs populations pour la prise en compte d'effets à longue distance. Une étude rapide d'un territoire à une échelle régionale avec une bonne prise en compte des éclairages privés pourra, quant à elle, s'appuyer sur les données satellites VIIRS-DNB.

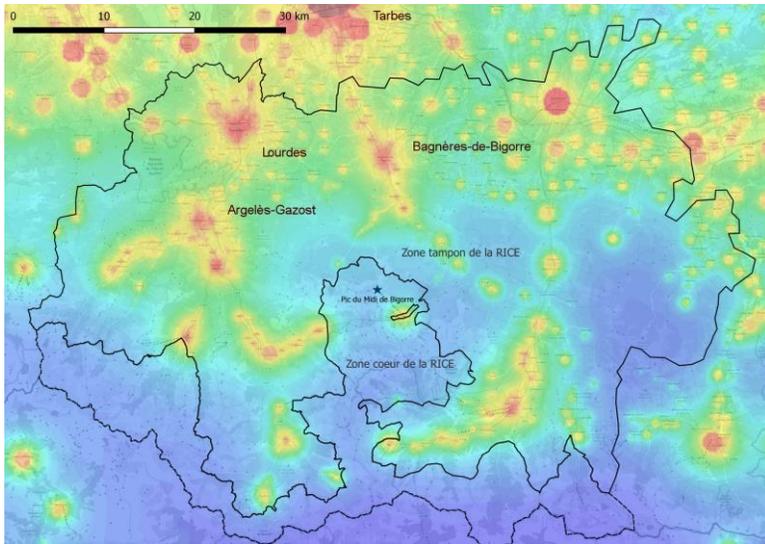
Les cas d'utilisation sont multiples, et le fait que le logiciel Otus puisse combiner l'utilisation de plusieurs types de sources de données en font un outil extrêmement versatile.

A titre d'exemple, les cartes suivantes montrent différentes simulations réalisées par le logiciel Otus sur le territoire de la réserve internationale de ciel étoilé (RICE) du Pic du Midi de Bigorre. Pour chaque carte, on décrit le type des données utilisées pour réaliser la simulation.

L'échelle de couleur utilisée dans les cartes est présentée ci-contre. Les niveaux de pollution lumineuse (qui correspondent à une brillance du fond de ciel) sont exprimés en magnitudes par seconde d'arc au carré ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) et les environnements typiques dans lesquels ils sont rencontrés sont indiqués.

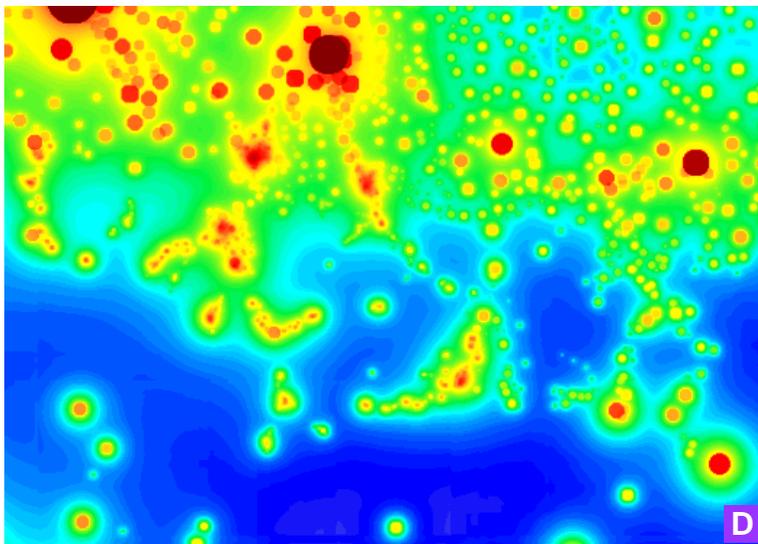
On notera sur cette échelle qu'une petite variation de la valeur de brillance du fond de ciel a de plus grands effets dans la zone de faibles brillances (sites sombres) que dans la zone de fortes brillances (ciels pollués).



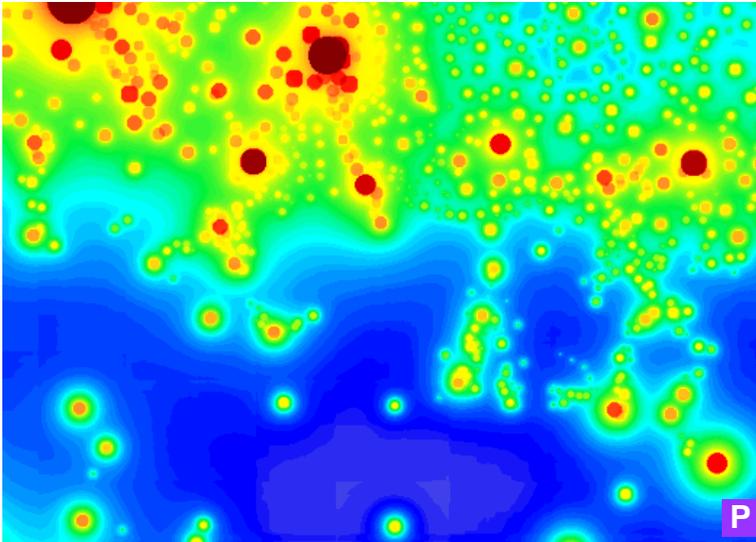


Simulation de la RICE du Pic-du-Midi avec des données détaillées au niveau des sources lumineuses pour la plupart des agglomérations de la zone tampon (ces données ne sont pas disponibles pour quelques agglomérations, auquel cas une heuristique globale basée sur la population est utilisée). Une zone d'influence très large avec des données au niveau des populations a été intégrée dans la simulation pour prendre en compte les effets à longue distance. Une partie de cette zone d'influence est visible sur la carte, mais, dans le cadre de la simulation, elle s'étend sur environ 200 km dans toutes les directions.

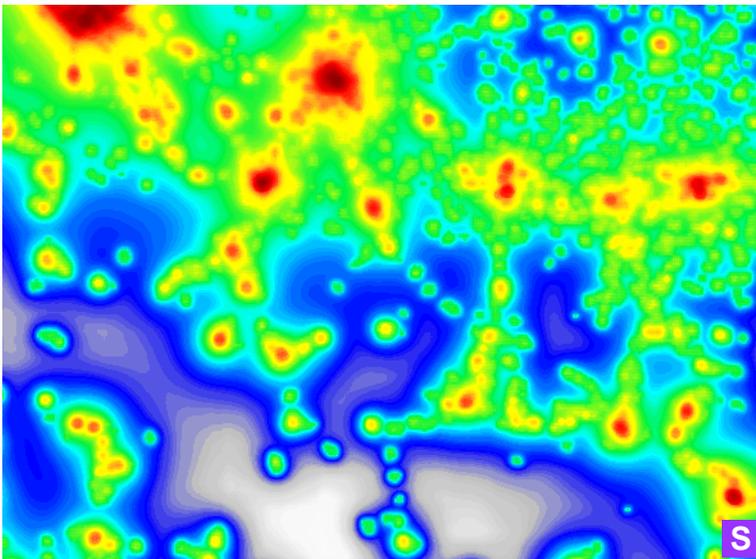
La zone cœur et la zone tampon sont tracées sur cette carte. Les positions de Tarbes, Lourdes, Argelès-Gazost et Bagnères-de-Bigorre sont indiquées.



Même simulation que dans la carte précédente (avec des données détaillées au niveau des sources lumineuses pour la zone tampon) mais sans le fond de carte géographique et avec un niveau de zoom un peu plus élevé. L'agglomération en haut et à gauche de la carte dont on aperçoit une partie est la ville de Pau.



Simulation dans laquelle uniquement les données des agglomérations avec les populations associées sont utilisées. On remarque que les topologies d'éclairage ne sont pas bien respectées si l'on compare à la carte précédente. En particulier, les hameaux éclairés près du cœur de la RICE ne sont pas pris en compte.

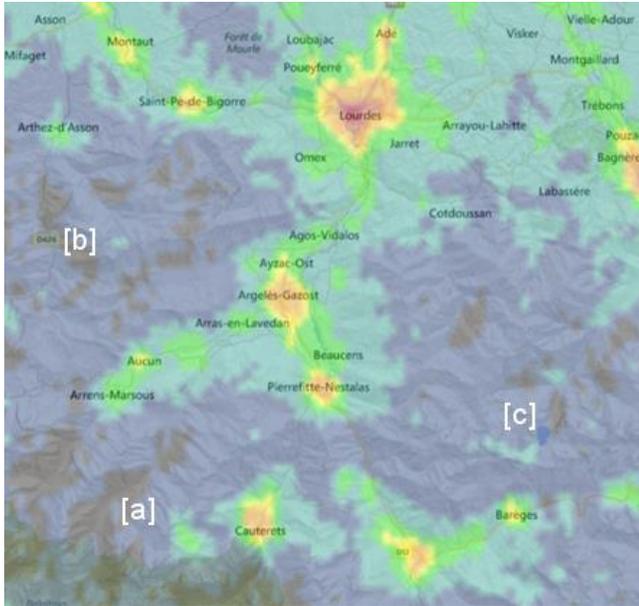


Simulation de la même zone que dans les cartes précédentes mais en utilisant uniquement les données satellites VIIRS-DNB (carte annuelle 2015). On constate bien que la résolution est moins élevée que dans la simulation avec les sources lumineuses discrètes. Le gros intérêt de cette simulation est que l'on prend en compte la topologie d'éclairage pour toutes les agglomérations présentes dans la carte.

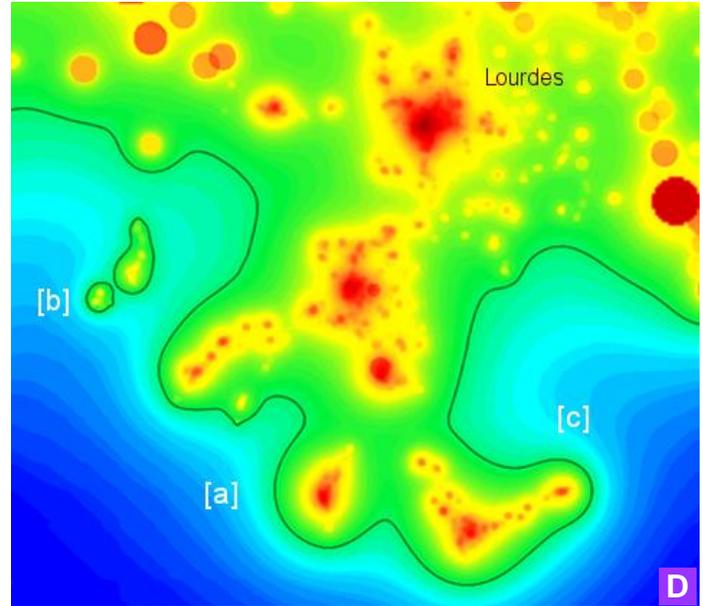
On observe un contraste plus élevé dans les zones sombres qui peut être en partie expliqué par le fait que l'on ne prend pas en compte dans cette simulation les contributions des agglomérations à moyenne et grande distance de la zone montrée. Une simulation plus large ou bien la prise en compte d'une zone d'influence permettrait de réduire cette différence de contraste.

On remarque une bonne similarité de la carte produite à partir des données VIIRS-DNB avec celle produite à partir des données de sources lumineuses discrètes, sauf en quelques endroits spécifiques qui demanderaient à être analysés finement (éclairage de zones industrielles ou artisanales privées, éclairage temporaire, etc.).

Un examen détaillé d'une zone de la RICE du Pic du Midi, en l'occurrence le Pays de Lourdes et des Vallées des Gaves (PLVG), permet de constater plusieurs différences intéressantes entre la carte de radiance VIIRS 2017 et la carte de pollution lumineuse produite par le logiciel Otus à partir des données de sources lumineuses discrètes qui sont disponibles pour toute la zone :



Carte de radiance satellite VIIRS 2017



Carte de pollution lumineuse Otus produite à partir des données de sources lumineuses discrètes

On constate par exemple qu’au point marqué **[a]** l’image satellite fait apparaître une source de radiance qui n’existe pas dans la carte de sortie de la simulation (absence de sources lumineuses). Une analyse détaillée de la zone fait apparaître deux explications : une petite station de ski (Cauterets-Le-Lys) est présente à cet endroit avec probablement de l’éclairage privé, mais la surface couverte montre que des dameuses au travail sur des pistes de ski ont probablement contribué aux sources de radiance sous forme de lumière parasite (la carte annuelle VIIRS 2017 dans laquelle les lumières parasites ont été éliminées n’est pas encore disponible). Les cartes VIIRS 2016 et 2018 font d’ailleurs apparaître des sources de radiance de formes différentes à cet endroit.

Le point marqué **[c]** sur les cartes situées au Nord de Barèges est lui aussi très probablement lié à des lumières parasites ou bien à un artefact dans les données VIIRS. Le point **[b]** quant à lui montre une zone où de l’éclairage public est présent (il s’agit des villages de Ferrières et Arbéost pour lesquels les données d’éclairage public sont disponibles). Toutefois, ces sources lumineuses apparaissent très peu dans la carte de radiance VIIRS, probablement parce que les passages satellites ont été réalisés à une heure de la nuit où l’éclairage public était en grande partie éteint dans ces deux villages.

On peut donc se rendre compte que les cartes de simulation obtenues à partir des sources lumineuses discrètes et celles obtenues à partir des cartes de radiance satellite sont complémentaires et permettent de déterminer plus finement les sources qui contribuent à la production de la pollution lumineuse. Le logiciel Otus est en train d’être développé et complété pour permettre une caractérisation automatique des différences entre les cartes obtenues à partir de ces deux sources de données.

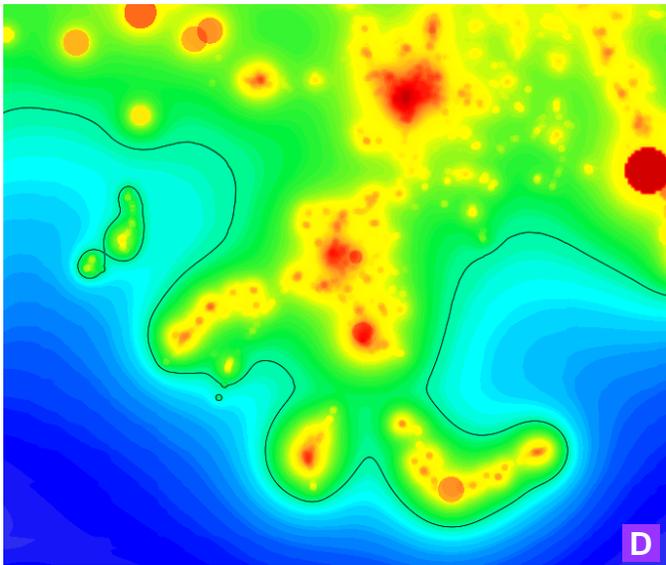
Quelle que soit la source de données utilisée, la calibration du modèle est d’une importance capitale pour pouvoir estimer de manière absolue les niveaux de pollution lumineuse. De ce point de vue, DarkSkyLab a entrepris plusieurs actions dont une démarche basée sur la mesure systématique et sur la durée de la luminosité du fond de ciel sur un territoire. Un outil spécifique appelé Ninoux a été développé pour mener cette tâche à bien.

Prise en compte de la couverture nuageuse

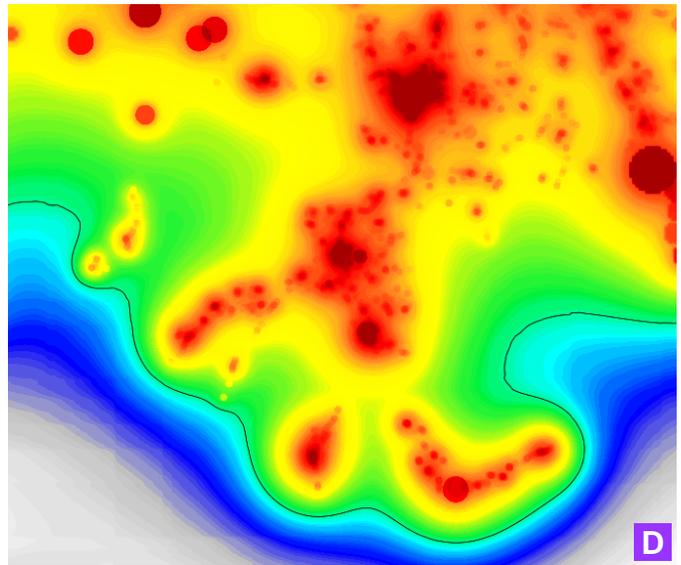
Lorsque l'on parle de pollution lumineuse, il est courant de se focaliser uniquement sur des estimations de brillance du fond ciel par temps clair. Cette tendance peut probablement être expliquée par le fait qu'initialement ce sont les astronomes qui se sont principalement intéressés à la mesure de la 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 végétales⁷.

Le logiciel Otus 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 lumineuse. 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 à gauche ci-dessous montre le résultat d'une simulation Otus du PLVG dans le cas d'un ciel clair et celle de la figure de droite montre la même zone mais simulée cette fois-ci par ciel couvert.



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



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.

Conclusion

La cartographie de la pollution lumineuse s'inscrit comme une démarche nécessaire dans de nombreuses actions qui visent à lutter contre les effets délétères de cette forme de pollution (études des effets sur la biodiversité et la santé humaine, préservation de la qualité de ciel pour l'observation astronomique, etc.). Elle représente en particulier un indicateur de pression pertinent pour comprendre les caractéristiques de la pollution lumineuse à différentes échelles (localement au niveau d'un territoire ou bien globalement à l'échelle d'un pays par exemple) ainsi que son évolution au cours du temps.

La synthèse présentée dans cet article à propos des différents modèles et sources de données utilisés pour la production de cartes de pollution lumineuse montre qu'il n'existe pas une approche unique permettant de répondre à l'ensemble des problématiques. Obtenir des cartes de pollution lumineuse pertinentes est un processus multifactoriel complexe qui doit être adapté à un objectif d'étude bien défini (diagnostic d'un existant, prise en compte de la couverture nuageuse, gestion des extinctions, définitions de seuils, etc.). De ce point de vue, les différentes sources de données disponibles sont toutes intéressantes à un titre ou à un autre et doivent être utilisées au mieux pour répondre aux besoins exprimés.

Bibliographie

- ¹ *Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse, Réflexion préliminaire*, Romain Sordello et al.
- ² *Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ?*, Romain Sordello
- ³ *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Fabio Falchi et al.
- ⁴ *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.
- ⁵ *Avex* (https://www.avex-asso.org/dossiers/wordpress/fr_FR/la-pollution-lumineuse-light-pollution)
- ⁶ *Mesure et modélisation de la pollution lumineuse*, DarkSkyLab (<https://darkskylab.com>)
- ⁷ *Worldwide variations in artificial skyglow*, Kiba et al.