

Modélisation de la pollution lumineuse à partir de données de radiance satellite

Philippe Deverchère ¹, Sébastien Vauclair ¹

Avril 2019

¹ DarkSkyLab, 3 rue Romiguières 31000 Toulouse, France

Tél : +33 6 42 44 81 60

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

Préambule

Cet article fait suite au document intitulé « *Les différentes approches de la cartographie de la pollution lumineuse* »¹ publié par DarkSkyLab et La TeleScop en septembre 2018 ainsi qu'au travail collaboratif de réflexion préliminaire sur les indicateurs nationaux de pollution lumineuse coordonné par Romain Sordello². Il se focalise spécifiquement sur la modélisation de la pollution lumineuse en partant de données de radiance satellite et établit les limitations d'une telle approche en utilisant la connaissance d'un territoire spécifique, en l'occurrence le SCoT des Vosges Centrales. Il montre comment ces limitations peuvent être contournées en utilisant des données de sources lumineuses complémentaires telles que sources discrètes géolocalisées ou des données de population, voire des données d'occupation des sols.

Introduction

L'impact de la pollution lumineuse sur les écosystèmes est maintenant avéré et de nombreuses études sur l'écologie des populations animales nécessitent de prendre spécifiquement en compte la pression que représente la lumière anthropique sur l'environnement.

La capacité à modéliser et à représenter les effets de la pollution lumineuse devient donc un enjeu important afin de compléter les données traditionnellement utilisées en écologie (zones à protéger, continuités écologiques terrestres et aquatiques, etc.). Cette capacité permet en particulier de définir le concept de « trames sombres » (ou « trames noires ») qui viennent se superposer à la connaissance des continuités écologiques³. 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 modèles de prédiction de qualité de ciel à partir des données sources qu'ils utilisent. Les principales sources de données utilisées sont les suivantes :

- Images satellites basse résolution mesurant la radiance⁴ ;
- Bases de données géolocalisées des agglomérations avec connaissance des populations. Les modèles qui utilisent ces données sont en général basés sur la loi de Walker⁵ ;
- Statistiques détaillées sur la nature des sols (tissu urbain, sol artificialisé, prairies, espaces boisés, etc.)⁶ ;
- Sources lumineuses discrètes géolocalisées⁷.

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)	<p> Bonne topologie d'éclairage non limitée à l'éclairage public</p> <p> Difficultés pour prendre en compte les extinctions</p>	<p> Impossibilité de réaliser des relevés fréquents ou à différentes heures de la nuit</p>	<p> Limitations dues aux bandes spectrales utilisées</p>
Agglomérations avec populations	<p> Très mauvaise prise en compte de la topologie d'éclairage</p>	<p> Prise en compte limitée des données d'extinction</p>	<p> Pas réellement d'heuristiques disponibles sur la nature spectrale de la pollution</p>
Données sur la nature des sols	<p> Assez bonne prise en compte de la topologie d'éclairage</p>	<p> Prise en compte limitée de la variabilité temporelle</p>	<p> Pas réellement d'heuristiques disponibles sur la nature spectrale de la pollution</p>
Sources lumineuses géolocalisées	<p> Très bonne prise en compte des topologies d'éclairage</p> <p> Nécessite des bases de données détaillées y compris pour l'éclairage privé</p>	<p> Bonne prise en compte des données d'extinction en utilisant les bases de données municipales</p>	<p> Connaissance des lampes utilisées au niveau des points lumineux</p>

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 Rayleigh 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 lumineuses 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.

Toutefois, dans de nombreuses situations, **une seule source de données** n'est pas suffisante pour modéliser de manière réaliste la pollution lumineuse sur un territoire. C'est en particulier le cas pour les données de radiance issues d'observations satellite puisqu'elles n'incluent pas certaines sources du fait des extinctions de plus en plus

nombreuses pratiquées par les collectivités locales et des horaires de survol. Dans la suite de cet article, nous allons illustrer cette limitation des données de radiance satellite en étudiant de manière détaillée le territoire du SCoT des Vosges Centrales qui intègre de nombreux extinctions. Nous verrons alors qu'il est nécessaire de compléter ces données par d'autres sources de manière à pouvoir obtenir une représentation plus réaliste de la pollution lumineuse sur un territoire.

Les limitations des données de radiance satellite

Les simulations de pollution lumineuse réalisées à partir des données de radiance satellite sont bien sûr très intéressantes (en particulier pour la constitution d'un indicateur clé de la pollution lumineuse) et relativement faciles à mettre en œuvre, mais elles doivent dans de très nombreux cas être complétées en utilisant des données de sources lumineuses discrètes si elles sont disponibles ou bien par des estimations de sources lumineuses basées sur les populations des communes (on peut aussi utiliser des heuristiques pour introduire des données de sources lumineuses à partir de la connaissance de la nature des sols).

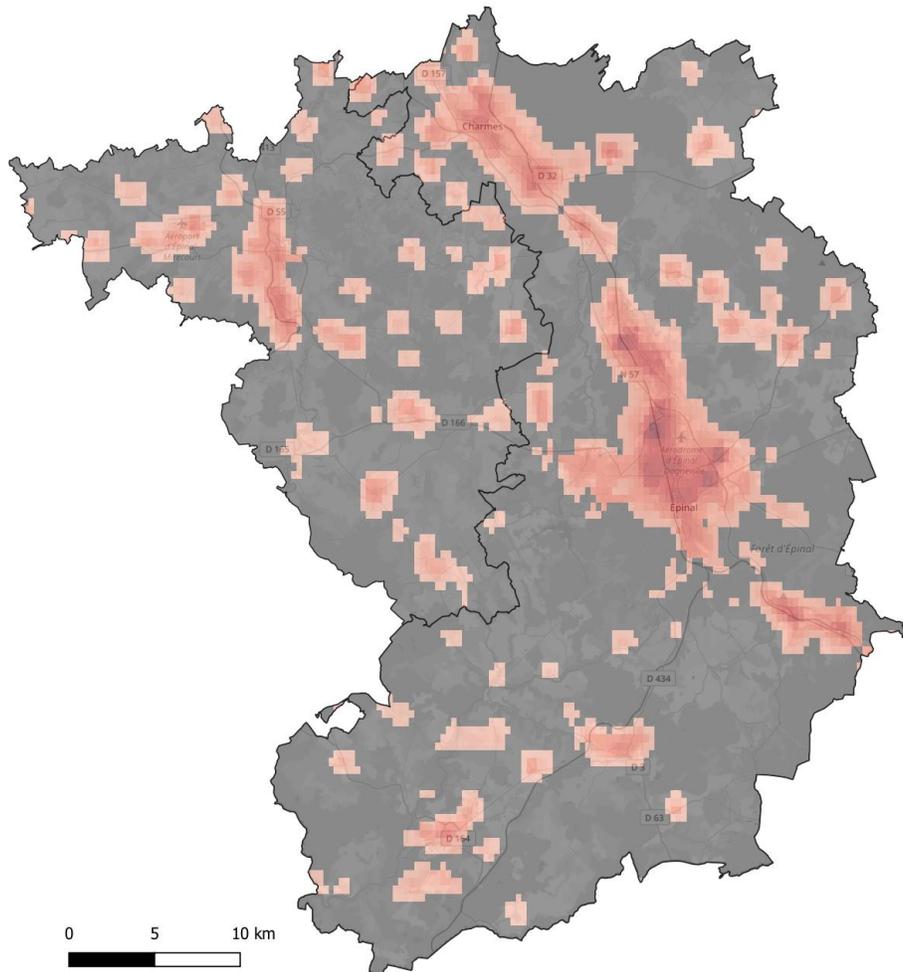
Cette nécessité est en grande partie due au fait que les données de radiance satellite **n'incluent pas** l'ensemble des sources lumineuses présentes au sol. En effet, des extinctions de l'éclairage public sont pratiquées par un nombre croissant de communes et d'une façon générale on maîtrise très mal les conditions de prise de vue des images utilisées pour constituer les données de radiance à partir des observations satellite. Les heures de passage des satellites (qui peuvent varier pour les images individuelles utilisées dans la constitution des jeux de données composites) ne sont pas ou peu connues et les extinctions ne sont donc pas maîtrisées. A l'échelle d'un très grand territoire cela n'est pas nécessairement problématique, mais pour des études locales (ce qui est le cas pour des trames vertes et bleues faisant intervenir le concept de trames sombres), c'est tout à fait problématique et des corrections sont nécessaires (ajout, et possiblement suppression, de sources). De plus, des algorithmes très spécifiques sont utilisés pour supprimer les sources transitoires, et dans certains cas ces algorithmes éliminent des sources bien réelles ou au contraire laissent passer des sources temporaires (on peut voir par exemple la contribution de dameuses sur les pistes de ski dans les Pyrénées).

Tout cela fait que les données de radiance doivent nécessairement être vérifiées et complétées, soit manuellement par ajout ou suppression de sources dans le moteur de simulation (c'est ce qui est fait aujourd'hui dans le logiciel de simulation Otus développé par DarkSkyLab), soit automatiquement (étude en cours pour une implémentation dans le logiciel Otus).

Il est important aussi de comprendre que le processus de "diffusion" des radiances satellite pour obtenir une représentation de la pollution lumineuse sur un territoire n'est pas déterminé une seule fois puis réappliqué avec des jeux de données différents. Un jeu de données composite va nécessiter une calibration spécifique qui est un processus relativement complexe. Par exemple, avec le moteur de simulation Otus, on n'obtient pas directement des résultats similaires au-delà des variations locales en utilisant le jeu de données composite 2015 publié par le NOAA (données VIIRS-DNB) et celui de 2016. C'est quelque chose qui est bien analysé par Falchi et al. dans leurs articles sur le "*New world atlas of artificial night sky brightness*" où des mesures SQM de terrain sont utilisés pour calibrer un composite particulier (cet atlas ne permet d'ailleurs pas de prendre en compte des spécificités locales du fait des limitations mentionnées au-dessus). Utiliser une carte de radiance satellite réalisée sur une nuit ou même un mois par le passage d'un satellite est donc un processus complexe, et, dans le cadre du logiciel de simulation Otus, on se limite pour l'instant aux jeux de données composites annuels.

Illustration avec le SCoT des Vosges Centrales

Pour illustrer les limitations d'une utilisation exclusive des données de radiance satellite afin de produire une carte de prédiction de la pollution lumineuse, nous avons réalisé des simulations sur le territoire du **SCoT des Vosges Centrales** qui est connu pour pratiquer de nombreuses extinctions de l'éclairage public.



La figure ci-contre montre le territoire du SCoT (composé à l'est de la *Communauté d'Agglomérations d'Épinal* et au nord-ouest de la *Communauté de Communes de Mirecourt-Dompaire*) sur lequel on a superposé une carte contrastée des données de radiance satellite (données NOAA VIIRS-DNB composite 2015).

Toutes les zones dans les tons rouges indiquent qu'une radiance non nulle existe dans les données VIIRS-DNB alors que les zones en gris foncé indiquent une radiance nulle.

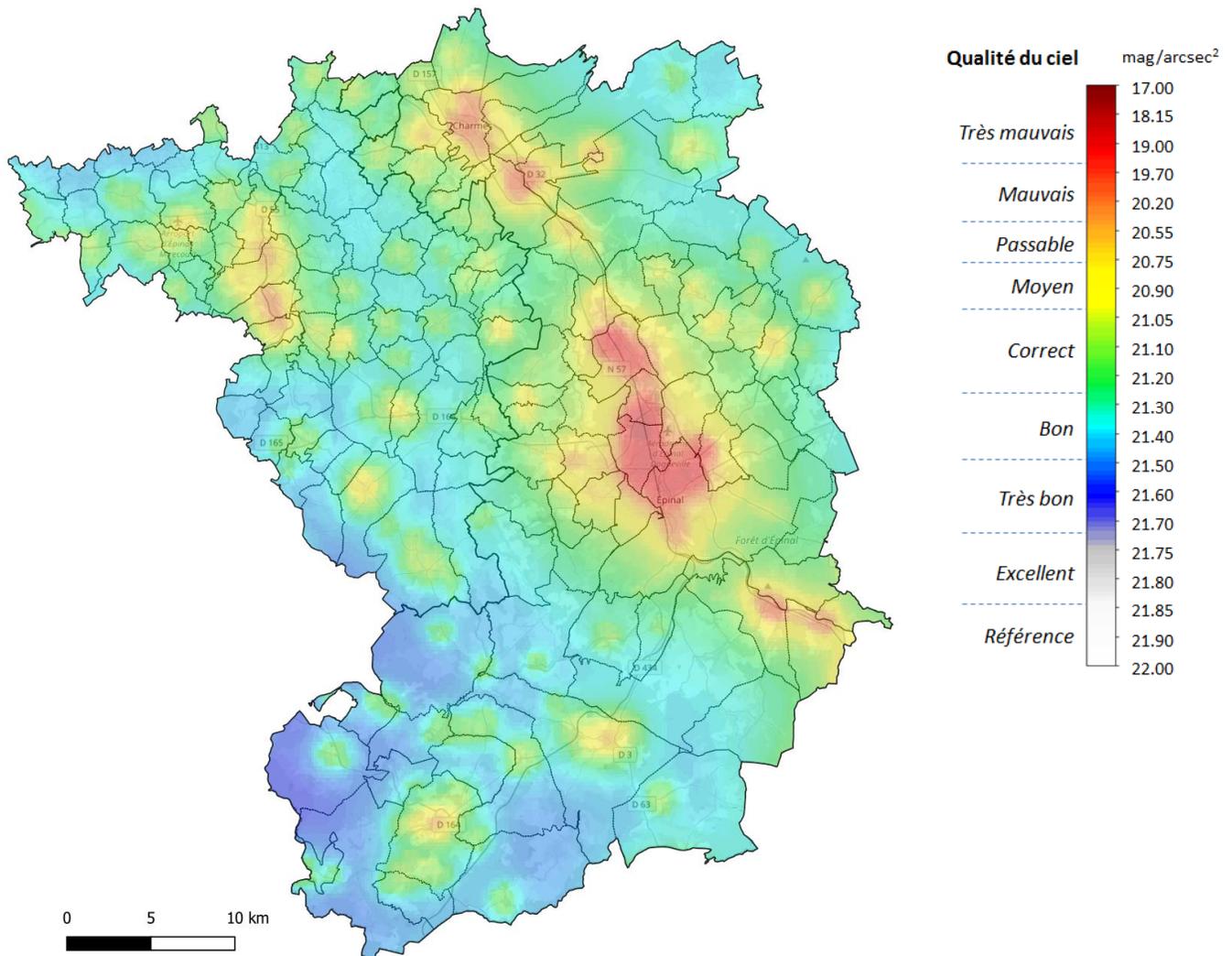
L'aspect « pixellisé » des zones de radiance non nulle est directement lié à la résolution des données VIIRS-DNB qui sont fournies avec un pas de 750 mètres.

On voit sur cette carte que les zones urbaines peuvent être particulièrement marquées avec des niveaux de radiance qui montent jusqu'à $50 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$. C'est le cas en particulier de l'agglomération urbaine d'Épinal avec des niveaux élevés et qui est bien visible le long de la Moselle sur la partie est de la carte.

Les données de radiance représentent une luminance énergétique et il ne s'agit en aucun cas d'une mesure directe de la pollution lumineuse sur un territoire. Le passage de la luminance à la détermination du **NSB** (*Night Sky Brightness* qui représente la mesure clé de la pollution lumineuse, par exemple la brillance de surface au zénith en tout point d'un territoire, exprimée en $\text{mag}/\text{arcsec}^2$) se fait en appliquant un modèle de diffusion ou bien, de manière plus réaliste, des heuristiques basées sur des convolutions avec des distances de coupure à partir des données de radiance (qui de plus ne concernent qu'une plage de longueur d'ondes bien spécifique). Avoir les données de radiance ne signifie donc pas du tout que l'on connaît la pollution lumineuse sur un territoire. Cette transformation est typiquement celle qui est opérée par le logiciel Otus développé par DarkSkyLab.

Simulation à partir des données de radiance

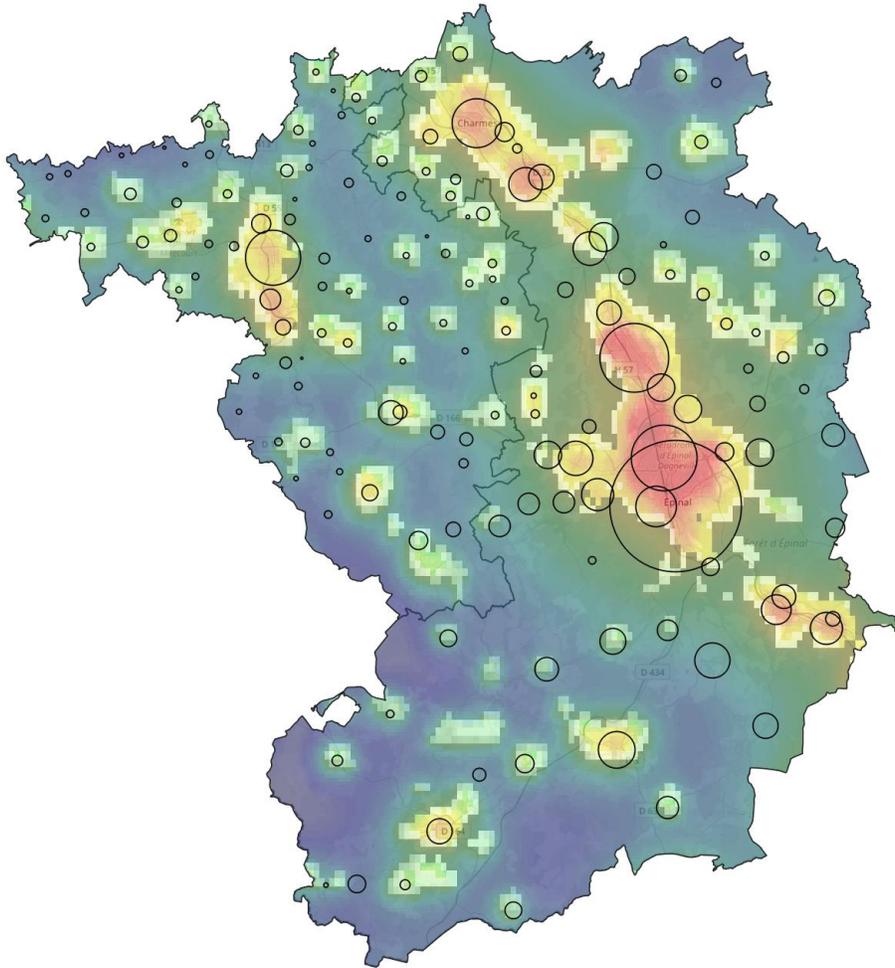
Une simulation de la pollution lumineuse à partir des données de radiance VIIRS-DNB (jeu de données composite annuel 2015) a été réalisée sur une large zone englobant le territoire du SCoT des Vosges Centrales à l'aide du logiciel Otus. Le résultat est montré ci-dessous avec l'échelle de couleur qui représente les différents niveaux de pollution lumineuse au zénith en chaque point du territoire du SCoT. Les limites des 156 communes du SCoT sont représentées sur la carte.



Simulation de la pollution lumineuse à partir des données de radiance

Il est important de noter qu'une carte de prédiction de la pollution lumineuse ne représente pas en soi une référence bien définie, tout simplement parce qu'il est nécessaire de spécifier à **quelles conditions météorologiques** cette carte s'applique. Est-ce une carte par ciel clair mais avec des conditions de transparence optimales de l'atmosphère (peu de charge aérosol, peu d'humidité) ? Ou bien montre-t-elle des conditions moyennes de beau temps par une nuit claire sans Lune ? Quelle serait la carte de pollution en présence d'un voile nuageux d'altitude ou bien avec un ciel totalement couvert ? Pour des études d'impact sur l'environnement, ce point est très important et les cartes doivent s'adapter à un contexte spécifique qui serait demandé. La carte qui est montrée ci-dessus représente une situation avec des conditions « moyennes » de ciel clair.

Identification des extinctions



La figure sur la gauche montre la superposition de la carte de pollution lumineuse obtenue à partir des données de radiance satellite avec :

- (1) La carte contrastée des radiances brutes ;
- (2) Les agglomérations représentées sous forme de cercles dont le rayon est proportionnel à la population.

Il est facile de voir sur cette carte que de nombreuses agglomérations sont « éteintes », en particulier des agglomérations de petite taille sur la partie nord-ouest du territoire. Le fait qu'il n'y ait pas de sources de radiance aux endroits où se situent ces agglomérations signifie très probablement que les horaires de passage des satellites pour les prises de mesures correspondaient à des heures où les communes étaient totalement ou partiellement éteintes.

Une analyse détaillée de la carte de radiance conjointement avec les localisations des agglomérations et leurs populations permet de déterminer que 57 communes, sur les 156 du SCoT, n'ont aucune radiance associée. On peut donc estimer qu'elles pratiquent des extinctions et que les algorithmes de création des composites annuels VIIRS-DNB n'ont détecté aucune radiance, ou alors ont éliminé des sources de radiance jugées comme étant transitoires.

Le cas de la ville d'Épinal est particulier puisque l'analyse des données de radiance semble indiquer que la ville était en situation d'extinction partielle au moment des passages satellite, mais cela reste difficile à déterminer de manière formelle. La figure ci-dessous montre les données de radiance superposées aux limites de la ville.

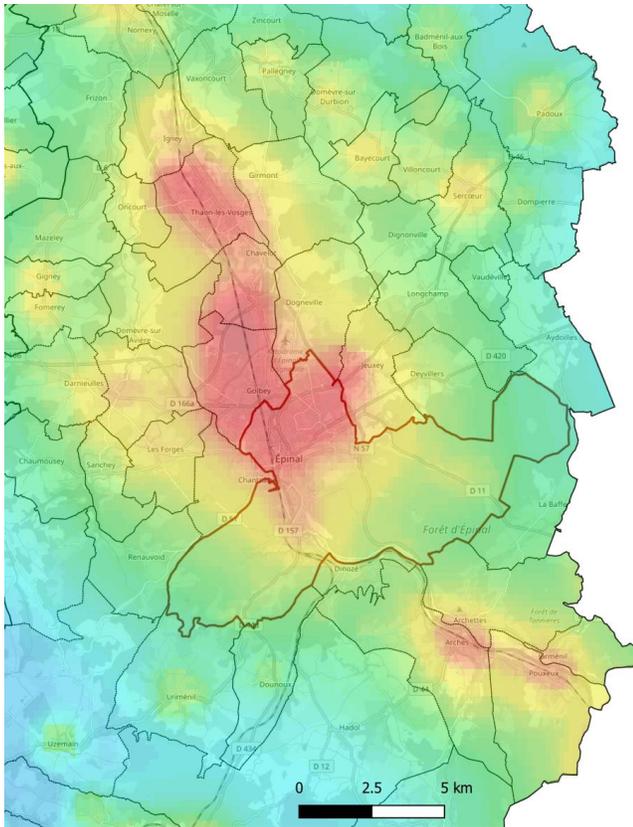


Sources de radiance sur Épinal

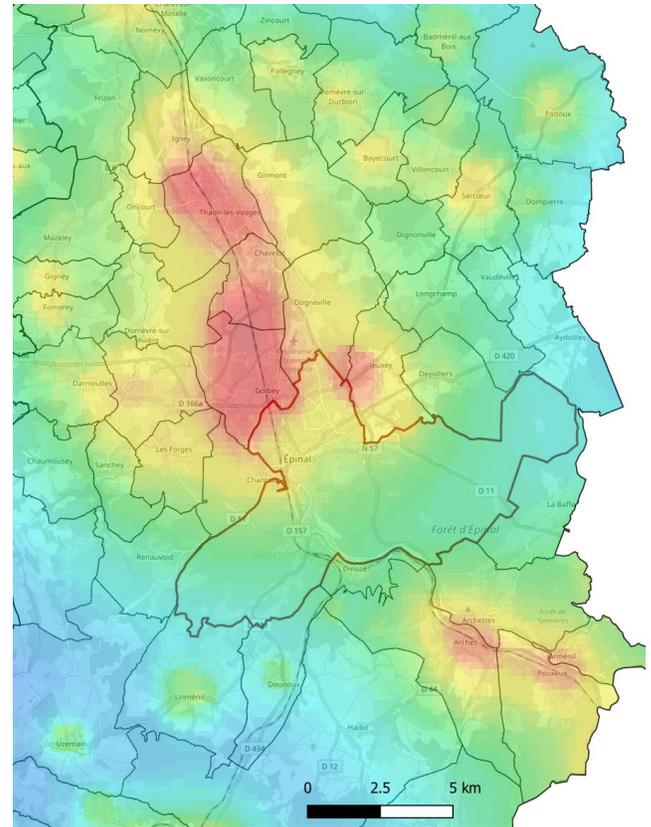
Simulation en mode « mixte »

Afin de modéliser correctement la pollution lumineuse, la solution consiste alors à supprimer les sources de radiance satellite sur le territoire de la commune d'Épinal puis d'utiliser dans le moteur de simulation les données au niveau des points lumineux qui sont connus pour cette ville. Ce mode de simulation « mixte » permis par le logiciel Otus est donc particulièrement intéressant dans ce cas puisqu'il permet de conserver les bénéfices des données de radiance satellite pour l'ensemble du SCoT (on ne dispose pas des données détaillées au niveau des points lumineux pour la vaste majorité des communes) tout en utilisant la connaissance détaillée des dispositifs d'éclairage sur la commune d'Épinal. On s'assure ainsi que la simulation est réalisée avec une ville totalement éclairée, par exemple dans une situation en début de nuit.

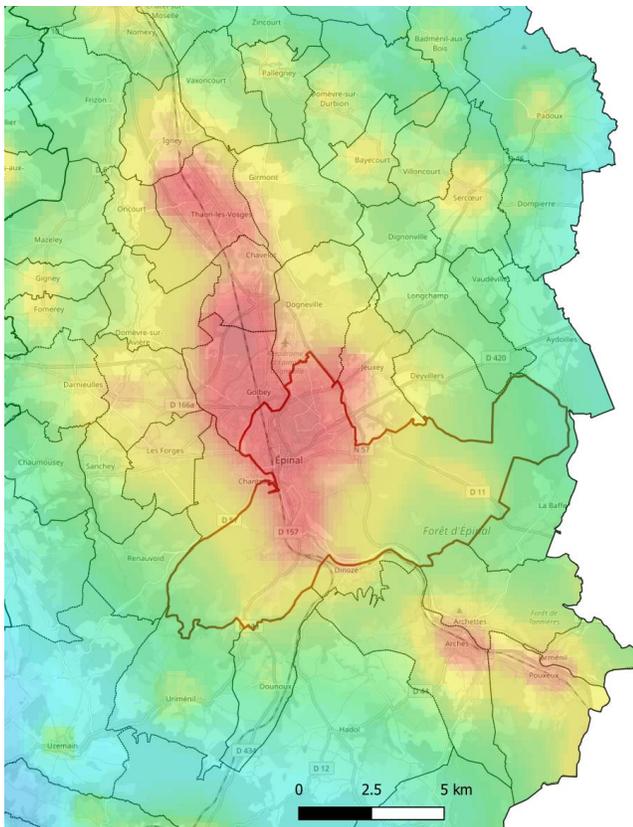
Les deux cartes ci-dessous montrent à gauche la pollution lumineuse obtenue par simulation sans suppression des radiances sur Épinal et à droite la pollution lumineuse obtenue après suppression de toutes les sources de radiance sur le territoire de la commune.



Simulation sans suppression des radiances sur Épinal



Simulation avec suppression des radiances sur Épinal



Simulation avec ajout des points lumineux sur Épinal

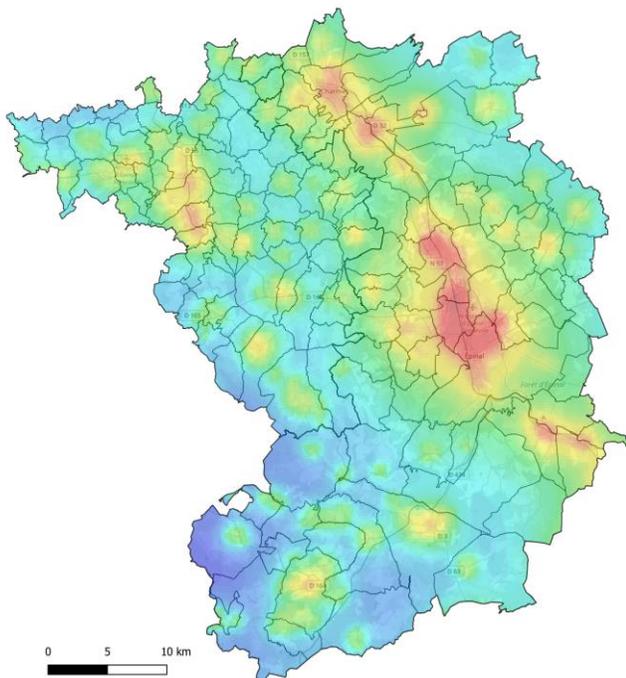
L'injection des 6725 points lumineux de la ville d'Épinal dans le moteur de simulation permet d'obtenir la carte présentée sur la gauche.

Par comparaison avec la simulation réalisée uniquement avec les données de radiance satellite au-dessus, on peut constater que la partie sud de l'agglomération ressort avec des niveaux de pollution lumineuse significativement plus élevés. Cela semble indiquer que les radiances satellites ont été acquises alors que cette zone était partiellement éteinte.

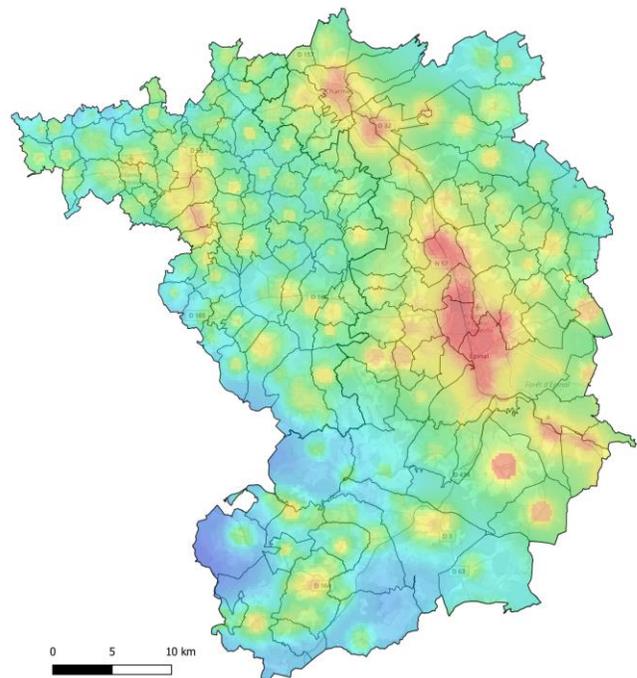
Les effets à moyenne distance sont aussi accrues comme on peut le voir sur les cartes en remarquant que les zones de ciel de qualité moyenne (en jaune avec un NSB de $20.9 \text{ mag/arcsec}^2$) s'étendent plus largement au sud de l'agglomération d'Épinal, réalisant quasiment la jonction avec les zones des communes de Arches, Archettes et Pouxoux au sud-est.

L'application de cette technique de simulation mixte de la pollution lumineuse à l'ensemble du territoire du SCoT des Vosges Centrales permet d'obtenir une carte qui reflète la situation où toutes les communes ont leur éclairage public en fonction, ce qui serait par exemple le cas en début de nuit. Le figure de gauche ci-dessous reprend la simulation su SCoT à partir des données de radiance VIIRS-DNB (jeu de données composite annuel 2015). La figure de droite montre quant à elle le résultat de la simulation mixte où trois types de données ont été utilisés :

1. Les données de radiance satellite pour la plupart des sources sur le territoire ;
2. Les données de sources lumineuses discrètes pour la commune d'Épinal ainsi que les communes de Arches, Capavénir Vosges et Pouxoux. On dispose en effet de telles données pour l'ensemble de ces communes et elles représentent 9788 points lumineux ;
3. Les données de population pour 53 communes du SCoT pour lesquelles l'absence de données de radiance ont permis de déterminer qu'elles pratiquaient l'extinction ou que leur radiance avait été éliminée dans les jeux de données composite VIIRS-DNB. L'utilisation des données de population permet d'estimer une contribution aux halos de pollution lumineuse de ces communes en utilisant une heuristique spécifique basée sur la loi de Walker. Certaines de ces 53 communes sont facilement identifiables sur la carte du fait de leur aspect caractéristique en forme de disque.



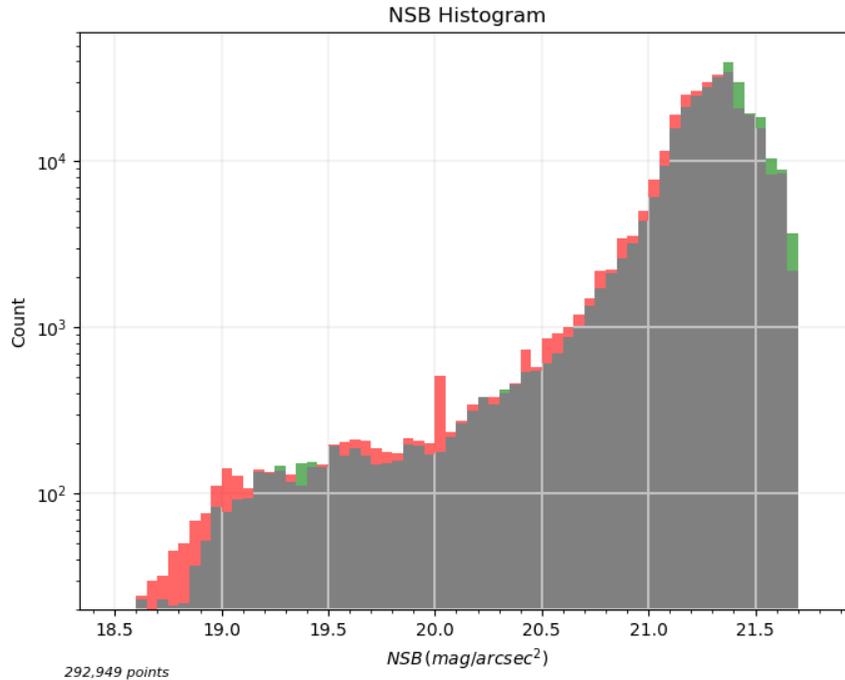
Simulation à partir des radiances sans modification



Simulation en mode mixte

Mis à part Épinal, la plupart des 57 communes pour lesquelles des données ont été ajoutées dans le moteur de simulation sont de taille modeste (sauf pour Hadol et Raon-aux-Bois au sud-est d'Épinal). Plus qu'une contribution massive à l'échelle du SCoT, leur allumage provoque plutôt un « mitage » avec essentiellement des effets locaux. On le voit en particulier dans la partie nord-ouest du SCoT. A une échelle plus globale, ces petites agglomérations étant très rapprochées, on voit tout de même que le niveau monte de manière sensible sur l'ensemble du territoire du SCoT.

Une façon simple de visualiser l'impact de l'ajout des sources lumineuses dans le mode de simulation mixte consiste à tracer pour chacune des deux situations (simulation des données de radiance uniquement et simulation en mode mixte) un histogramme des NSB de l'ensemble des points du rectangle qui englobe le territoire du SCoT.



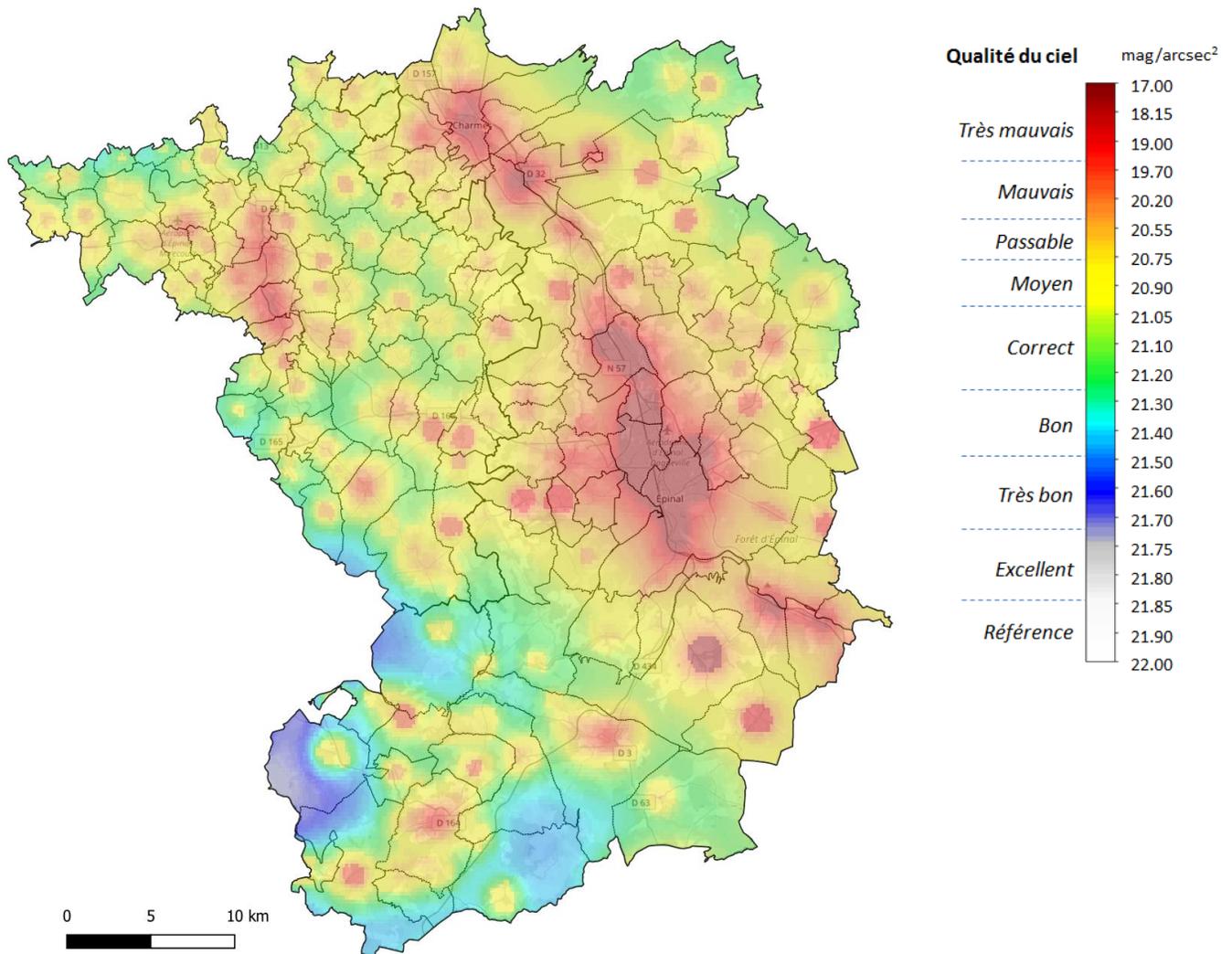
Sur la figure ci-dessus, les zones en vert correspondent à la simulation avec les données de radiance uniquement et les zones en rouge correspondent à la simulation en mode mixte (les zones en gris sont celles où il y a un recouvrement des deux histogrammes). L'échelle de comptage de l'historgramme est logarithmique et on peut constater facilement qu'à partir des zones sombres (hautes valeurs à droite de l'historgramme) ont disparu dans la simulation en mode mixte alors que les zones les plus polluées (à gauche de l'historgramme) remontent de manière significative. On est donc dans une situation où la pollution lumineuse s'est accrue sur le territoire.

Influence de la couverture nuageuse

Lorsque l'on parle de pollution lumineuse, il est courant de se focaliser uniquement sur des estimations 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 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%). La carte ci-dessous montre le résultat de la

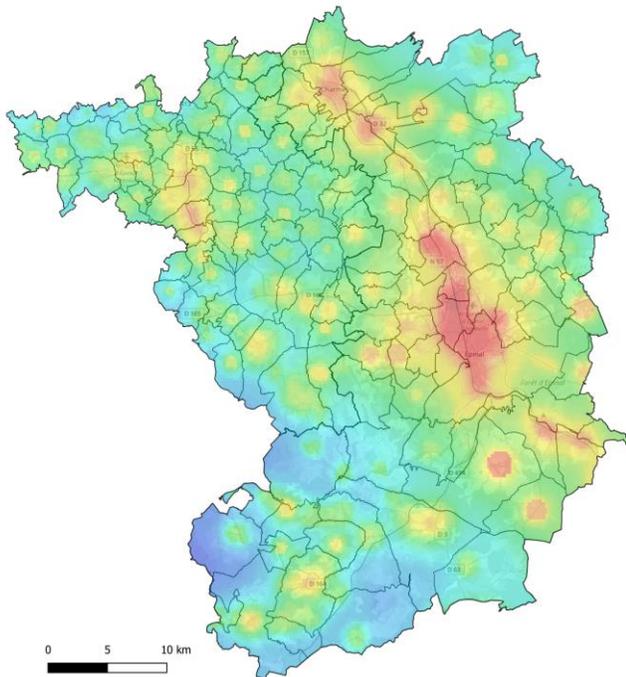
simulation réalisée sur le territoire du SCoT des Vosges dans de telles conditions de ciel couvert et avec l'ensemble des communes du territoire « allumées » :



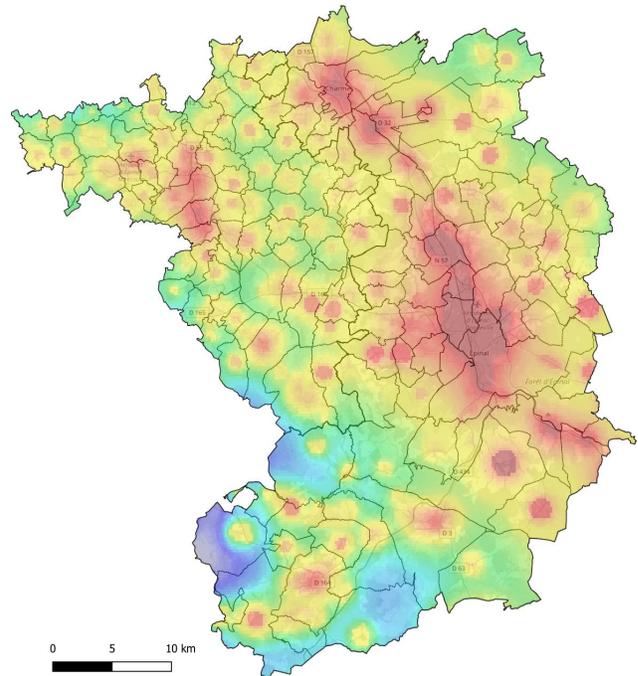
Simulation par conditions de ciel couvert

On peut constater la forte dégradation de la qualité de ciel par rapport à des conditions de ciel clair. Comme on peut s'y attendre, la présence de nuages et la proximité d'agglomérations importantes et très éclairées (Epinal en particulier) amplifient la pollution lumineuse à l'échelle du SCoT. Seule la partie sud-ouest est épargnée et on peut même constater une amélioration pour une zone qui se trouve à plus grande distance de sources lumineuses importantes.

Les deux cartes de pollution lumineuse par ciel clair et par ciel couvert (toutes les deux avec un « allumage » de toutes les communes) sont mises côte à côte ci-dessous afin de pouvoir les comparer facilement.



Simulation par ciel clair



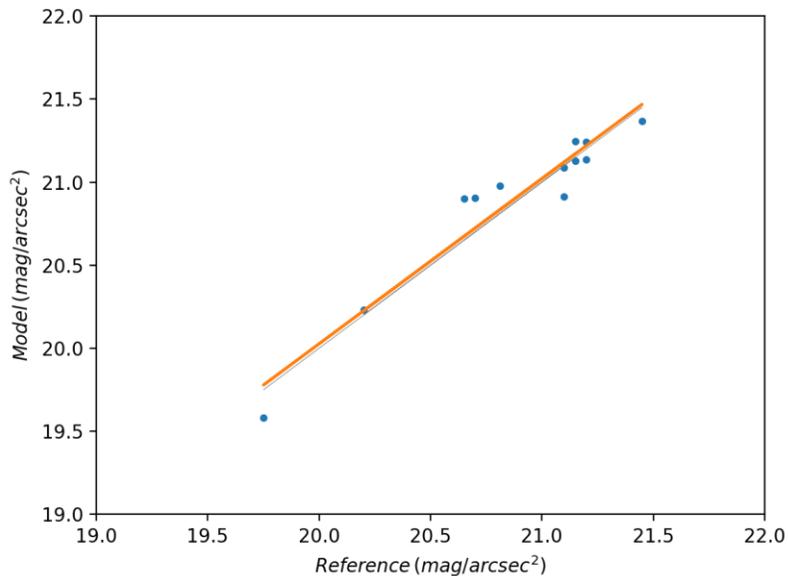
Simulation par ciel couvert

Calibration du modèle de simulation

Comme cela a été indiqué plus haut, l'utilisation d'un jeu de données de radiance satellite dans un moteur de simulation et de prédiction de la pollution lumineuse nécessite une calibration initiale. L'approche utilisée par DarkSkyLab avec son logiciel de simulation Otus pour calibrer au mieux un jeu de données composite annuel VIIRS-DNB et produire des cartes de prédiction de la pollution lumineuse les plus représentatives possible de la réalité consiste à calibrer les paramètres du modèle en utilisant des mesures réalisées sur le terrain. Les valeurs de NSB utilisées par DarkSkyLab pour réaliser la calibration d'un jeu de données répondent aux exigences suivantes afin de minimiser les biais et les imprécisions :

- Elles doivent être le résultat de mesures réalisées en continu sur plusieurs jours au moins, voire plusieurs semaines, sur chacun des sites utilisés. En effet, seule une approche statistique de la mesure du NSB permet de réellement caractériser la pollution lumineuse au zénith sur un site donné ;
- Elles doivent être réalisées sur un nombre suffisant de sites de mesure représentant des niveaux de pollution lumineuse variés, allant typiquement d'un ciel urbain jusqu'à un ciel de bonne qualité avec un NSB d'au moins $21,5 \text{ mag/arcsec}^2$. Il est préférable d'utiliser des sites au sein d'une même région afin de minimiser le nombre de simulations nécessaires au processus de calibration ;
- Pour chaque site de mesure, il est nécessaire de déterminer deux valeurs de NSB caractéristiques : un NSB représentatif de **conditions de ciel clair moyennes** et un NSB représentatif de **conditions de ciel clair optimales**. L'approche statistique de la mesure du NSB permet d'obtenir ces deux valeurs caractéristiques.

Une fois le jeu de NSB de calibration assemblé, le logiciel de simulation Otus réalise automatiquement des simulations de manière répétée en faisant varier un petit nombre de paramètres clés dans des intervalles prédéfinis. Après chaque simulation, les prédictions du modèle sont comparées au NSB caractéristiques mesurés sur le terrain et les paramètres retenus pour le modèle à l'issue du processus de calibration sont ceux qui minimisent les différences entre les prédictions et les mesures. Ce processus est réalisé pour des conditions de ciel clair moyennes et pour des conditions de ciel clair optimales qui représentent deux des modes de simulation du logiciel Otus lorsque l'on utilise des données de radiance satellite (la calibration n'est pas réalisée pour le mode de simulation par ciel couvert car ces conditions sont hautement variables et plus difficilement caractérisables dans les mesures statistiques du NSB).



A titre d'exemple, la figure sur la gauche montre l'ajustement optimal réalisé en utilisant un ensemble de mesures réalisées durant plusieurs semaines sur 12 sites dans la région de Limoges. L'axe horizontal représente les valeurs de NSB mesurées sur le terrain et l'axe vertical représente les prédictions du modèle Otus. Il s'agit là d'un ajustement pour des conditions de ciel clair moyennes.

On peut constater que la droite de régression linéaire en orange se confond quasiment avec la diagonale du graphique (en gris).

Construction d'un indicateur national

Comme on l'a vu dans les paragraphes précédents, la prise en compte des extinctions et la calibration du modèle de simulation sur la base de mesures de terrain sont les deux aspects importants qu'il convient de traiter lorsque l'on souhaite rendre plus fiable la prédiction de la pollution lumineuse sur un territoire en partant de données de radiance satellite. On peut donc tout à fait imaginer construire un **indicateur national de la pollution lumineuse** en réalisant cette démarche à l'échelle de la France métropolitaine. Les grandes étapes de la constitution d'un tel indicateur sont les suivantes :

1. Utilisation d'un jeu de données de radiance satellite récent. A cet égard, le jeu de données composite annuel 2016 *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band (VIIRS-DNB)*⁸ représente certainement la meilleure solution. Il s'agit en effet de la version disponible la plus récente d'un jeu de données composite annuel VIIRS-DNB.
2. Repérage des extinctions par un processus semi-automatisé qui prendrait en entrée le jeu de données de radiance et la base de données géolocalisée des communes de France avec leurs populations. La première étape qui consisterait à identifier les radiances manquantes serait entièrement automatique, mais une vérification dans un outil de visualisation adapté serait ensuite nécessaire pour corriger d'éventuels problèmes. Une fois ce processus d'identification réalisé, une liste des communes pratiquant l'extinction

serait produite. Des simulations plus réalistes en mode mixte (en utilisant les populations) seraient alors réalisables (comme cela est décrit plus haut dans cet article).

3. Il conviendrait ensuite de rassembler un ensemble de mesures de terrain conséquent avec pour chaque site identifié la disponibilité des deux valeurs caractéristiques de NSB (conditions de ciel clair moyennes et conditions de ciel clair optimales). Ces données sont en très grande partie disponibles aujourd'hui sur la base des campagnes de métrologie déjà réalisées par DarkSkyLab au sein de territoires variés.
4. Le modèle de simulation serait ensuite calibré en réalisant des simulations en mode mixte (avec utilisation des données de population) dans plusieurs zones qui incluent l'ensemble des mesures de terrain.
5. Une simulation finale pour l'ensemble de la France métropolitaine serait ensuite réalisée avec les paramètres optimaux qui auront été déterminés dans la phase de calibration. La carte géoréférencée haute résolution résultante constituerait alors l'indicateur national recherché. La brillance de fond de ciel (exprimée en $\text{mag}/\text{arcsec}^2$) sera alors disponible pour n'importe quel point du territoire pour 3 conditions différentes de ciel : conditions de ciel clair optimales, conditions de ciel clair moyennes et couverture nuageuse totale (dans le cas d'une couche d'altitude). Pour cette dernière condition de ciel, il ne s'agirait que d'une estimation dans la mesure où la caractérisation d'un ciel nuageux est plus difficile à réaliser du fait de la grande variété de formes qu'un tel ciel peut prendre.

A plus long terme, plutôt que d'utiliser les données de populations pour compléter les radiances manquantes dues aux extinctions dans les simulations en mode mixte, il sera possible d'utiliser les données de sources lumineuses discrètes lorsqu'elles seront disponibles à grande échelle.

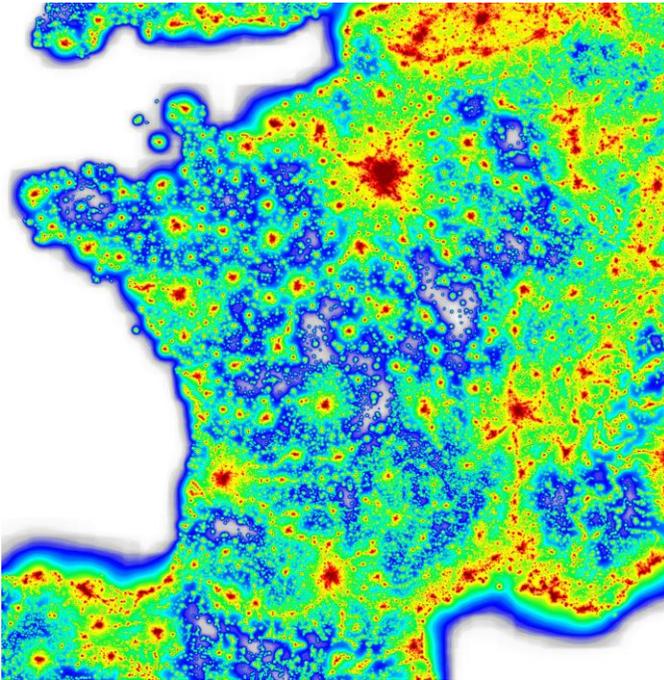
Cette démarche s'inscrit dans la continuité des conclusions du rapport remis par l'UMS Patrinat (MNHN) à l'Observatoire national de la biodiversité (ONB) et qui insiste sur la nécessité d'une bonne connaissance de l'indicateur de pression que constitue l'éclairage nocturne, à grande échelle et avec une bonne résolution spatiale.

Conclusion

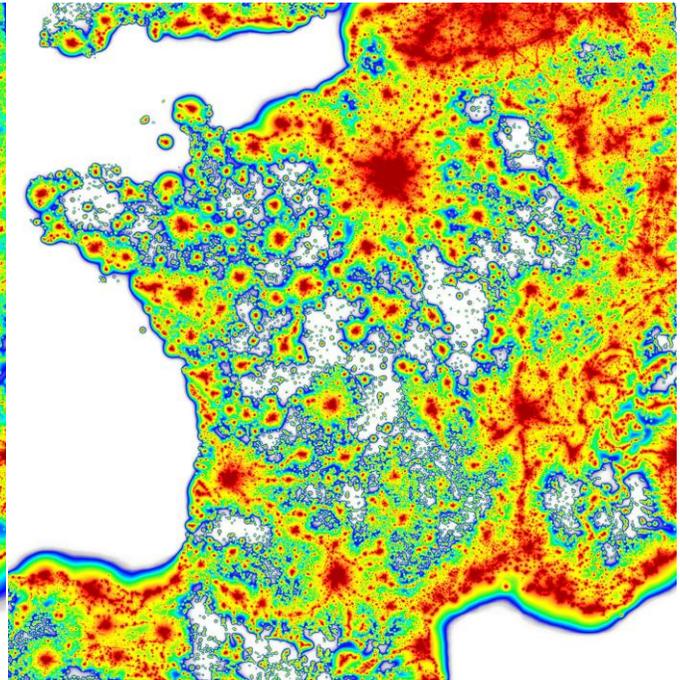
La modélisation de la pollution lumineuse à partir de données de radiance satellite constitue une voie prometteuse pour définir un indicateur national de pression de la lumière anthropique sur l'environnement. Toutefois, comme cela a été montré dans cet article, il est nécessaire de calibrer le modèle pour chaque jeu de données de radiance brutes et aussi de corriger les données afin de prendre en compte les extinctions totales ou partielles pratiquées par les agglomérations et ainsi permettre une utilisation de l'indicateur à une échelle locale. Cette prise en compte des extinctions peut être en partie automatisée grâce à la connaissance détaillée des réseaux d'éclairage et en réalisant des simulations « mixtes » qui utilisent à la fois les données de radiance et les données de sources lumineuses discrètes (ou au pire des données de population si ces dernières ne sont pas disponibles).

Les mesures de radiance réalisées depuis des satellites nécessitent par définition que le ciel soit parfaitement dégagé au moment des prises de vue. Cela ne doit cependant pas faire oublier que sur des échelles courtes et moyennes (jusqu'à quelques dizaines de kilomètres), la présence de nuages joue un rôle d'amplificateur de la pollution lumineuse à proximité des agglomérations. Il est donc nécessaire qu'un indicateur de pression de la lumière basé sur la modélisation de radiance satellite soit suffisamment flexible pour s'adapter à différentes conditions météorologiques depuis un ciel parfaitement clair jusqu'à un ciel entièrement couvert.

Pour illustrer ce dernier point, les cartes ci-dessous montrent le résultat d'une simulation de la pollution lumineuse sur l'ensemble du territoire français avec à gauche des conditions de ciel clair moyennes et à droite la présence d'une couverture nuageuse importante (ciel couvert à plus de 95%). Les extinctions n'ont pas été prises en compte pour produire ces cartes. Dans la carte simulée avec un ciel couvert, on peut voir que certaines zones sont très fortement impactées sur de grandes échelles (région parisienne, l'ensemble de la côte Méditerranéenne, la région Lyonnaise et la vallée du Rhône, etc.). Comme attendu, les zones initialement les moins impactées dans la carte de ciel clair s'élargissent jusqu'à ce qu'elles rencontrent des zones relativement polluées. On observe aussi un "mitage" de certaines zones du fait de la présence de très nombreuses petites agglomérations disséminées. Certaines de ces zones sont poreuses et permettent une continuité des corridors écologiques nocturnes, alors que d'autres forment des barrières qui ne peuvent pas être franchies.



Simulation par ciel clair



Simulation par ciel couvert

Bibliographie

- ¹ Voir <https://darks skylab.com/publications/Cartographie%20de%20la%20pollution%20lumineuse%20-%20septembre%202018.pdf>
- ² Voir le rapport de l'UMS PatriNat *Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse* sur : <http://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/construire-indicateurs-nationaux-sur-pollution-lumineuse>
- ³ *Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ?* Romain Sordello
- ⁴ *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Fabio Falchi et al.
- ⁵ *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.
- ⁶ *Avex* (https://www.avex-asso.org/dossiers/wordpress/fr_FR/la-pollution-lumineuse-light-pollution)
- ⁷ *Mesure et modélisation de la pollution lumineuse*, DarkSkyLab (<https://darks skylab.com>)
- ⁸ Voir le site du NOAA sur https://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html