



**AUBE. Aménagement, urbanisme, biodiversité, éclairage.
Fiche n° 9 : Utiliser l'imagerie satellitaire pour analyser
l'éclairage nocturne**

Emma Bousquet, Aurélien Mure, Florian Greffier, Samuel Busson, Bastien Nguyen
Duy - Bardakji, Sarah Potin, Sébastien Vauclair, Philippe Deverchère

► **To cite this version:**

Emma Bousquet, Aurélien Mure, Florian Greffier, Samuel Busson, Bastien Nguyen Duy - Bardakji, et al.. AUBE. Aménagement, urbanisme, biodiversité, éclairage. Fiche n° 9 : Utiliser l'imagerie satellitaire pour analyser l'éclairage nocturne. Cerema - Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement. 2024. <hal-04939817>

HAL Id: hal-04939817

<https://hal.science/hal-04939817v1>

Submitted on 11 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ETALAB - Open licence

FICHE TECHNIQUE

UTILISER L'IMAGERIE SATELLITAIRE POUR ANALYSER L'ÉCLAIRAGE NOCTURNE



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

PRÉSENTATION DE LA SÉRIE

La série de fiches « AUBE » incite à concevoir l'éclairage différemment, par l'intégration conjointe des enjeux de biodiversité, d'usage et d'économie d'énergie. Elle décrypte aussi l'arrêté ministériel du 27 décembre 2018 portant sur les nuisances lumineuses afin de vous aider dans sa mise en oeuvre. Elle s'adresse aux élus et techniciens des collectivités territoriales, gestionnaires, aménageurs et bureaux d'études des domaines de l'éclairage et de l'écologie, et aux gestionnaires d'espaces naturels.

INTRODUCTION

L'éclairage artificiel nocturne répond à différents besoins humains, notamment des besoins sociaux et économiques permettant la poursuite des activités lorsque la luminosité naturelle n'est plus suffisante. Mais il induit aussi une pollution lumineuse qui n'est pas sans impact sur la santé humaine ni sur la biodiversité. En effet, les cycles naturels qui régissent le fonctionnement des écosystèmes et la physiologie des organismes vivants (alternance jour/nuit, évolution saisonnière de la durée du jour, phases de la lune, etc.) sont altérés par un apport de lumière artificielle la nuit [8]. La lumière artificielle nocturne est ainsi une source de pression majeure sur la biodiversité avec l'artificialisation des sols et les pesticides ; la cartographie est donc primordial pour identifier les zones prioritaires à préserver ou à restaurer. Pour ce faire, différents types de données peuvent être mobilisées :

1. Les données locales : bases de données des sources lumineuses géolocalisées, mesures physiques de terrain (éclairage, luminance, spectre, etc.).
2. Une extrapolation de l'éclairage au sol à partir de données d'occupation du sol (cartographie des routes, des sols artificialisés, du tissu urbain, etc.).
3. Les images de télédétection (drone, avion, ballon-sonde, photographies prises depuis l'ISS ou images satellite).

La pollution lumineuse se définit du point de vue biologique comme toute lumière artificielle nocturne visible ; et du point de vue social comme toute part de la lumière qui n'est pas utile pour répondre aux besoins. Le concept de pollution lumineuse inclut donc une diffusion de la lumière dans l'espace, qui peut être modélisée à partir de l'une des trois sources de données citées précédemment ou d'un assemblage de plusieurs de ces sources.

Cette fiche présente les spécificités de l'utilisation de **l'imagerie satellitaire nocturne**, ses avantages, inconvénients et complémentarités vis-à-vis des autres sources de données. Elle a vocation à présenter :

- l'éventail des données satellitaires nocturnes disponibles, publiques et privées ;
- leurs produits dérivés ;
- des exemples d'exploitation dans le cadre de la lutte contre la pollution lumineuse, dans le but de préserver la biodiversité (trame noire*), la santé humaine ou encore la qualité du ciel étoilé.

Cette fiche s'adresse à des techniciens de collectivités ou de bureaux d'étude travaillant sur l'éclairage artificiel nocturne, ou à des élus souhaitant s'approprier le sujet pour choisir les solutions techniques les plus adaptées aux spécificités de leur territoire.

SOMMAIRE

1 • Fonctionnement des satellites à acquisitions nocturnes	p. 4
2 • Analyse et comparaison des principaux satellites nocturnes	p. 13
3 • Produits et services issus de l'imagerie satellitaire nocturne	p. 16
4 • Comment utiliser les images satellite pour des projets autour de la trame noire	p. 21

1 • FONCTIONNEMENT DES SATELLITES À ACQUISITIONS NOCTURNES

La plupart des observations nocturnes sont obtenues à partir de satellites ou de constellations (groupes de satellites) à usage diurne, lorsque les opérateurs le permettent. Certains ont un mode d'acquisition spécifique la nuit (instrument VIIRS, par exemple). Les résolutions varient du mètre à quelques centaines de mètres. On constate un intérêt croissant pour les acquisitions nocturnes, en particulier à résolution métrique, initié par l'arrivée de la constellation de satellites nocturnes Jilin.

D'autres satellites optiques sont dédiés à l'observation nocturne de la Terre (Luoja et SDGSAT, par exemple). Ils ont des caractéristiques techniques spécifiques à l'observation de nuit (sensibilité, technologie employée, bandes spectrales, heure de passage, altitude, etc.). Ces satellites permettent d'observer toute source lumineuse — relativement intense — sur la surface terrestre : feux, lave en fusion, éclairage anthropique, etc.

N.B. Les différents satellites mentionnés sont décrits dans la partie 2.

1.1. Ce que le satellite « voit » : la radiance

Le capteur embarqué à bord des satellites optiques nocturnes capte la **radiance**^{*1} (ou « luminance énergétique »). Celle-ci quantifie la puissance d'un rayonnement émis par un élément de surface dans une direction donnée, donc perçue depuis un certain point d'observation. Il est ainsi possible de représenter la radiance d'un environnement mesurée ou simulée depuis le sol (usager de l'espace public, conducteur) ou depuis le ciel (satellite ou avion). La radiance est exprimée par unité de surface (mètre carré) et par unité d'angle solide* (portion d'espace située dans un cône, exprimée en stéradian*) (Figure 1). Son unité est le $W.m^{-2}.sr^{-1}$ (watts par mètre carré et par stéradian).

Le rayonnement peut être direct (ex. : source de lumière émettant vers le ciel) ou indirect (ex. : lumière réfléchiée par l'espace public, diffusée dans l'atmosphère).

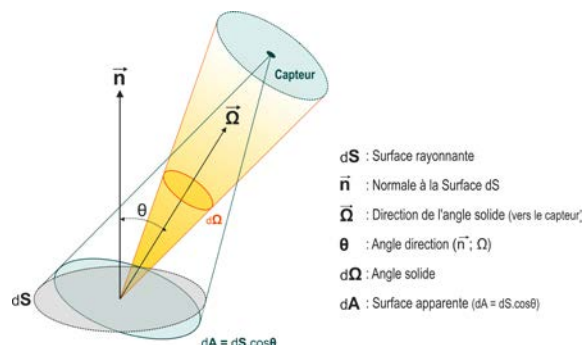


Figure 1 : radiance* de la surface dS dans l'angle solide* $d\Omega$ pour une direction $\vec{\Omega}$ faisant un angle θ avec la normale \vec{n} à la surface

1.2. Caractéristiques techniques : spectre, résolution, fauchée et heure de passage

Un capteur satellitaire se définit selon plusieurs spécifications (caractéristiques techniques) : sensibilité et résolution spectrales, résolution spatiale et temporelle, fauchée*, heure de passage, etc., qui sont explicitées ci-dessous. Le choix du type d'imagerie satellitaire le plus adapté à son besoin résulte ainsi d'un compromis entre toutes ces spécifications.

1.2.1 - SENSIBILITÉ ET RÉOLUTION SPECTRALES

Un capteur satellitaire dispose d'une **sensibilité spectrale** correspondant aux plages de longueurs d'onde sur lesquelles il peut acquérir la radiance de la surface imagée (Figure 2). La **résolution spectrale** indique la largeur des bandes spectrales qui couvrent cette sensibilité (Figure 3). Un capteur monospectral ne dispose que d'une seule bande, généralement assez large, appelée panchromatique (sensible à toutes les longueurs d'onde du domaine du visible). Plus les bandes spectrales sont nombreuses et étroites, plus la résolution spectrale est fine. On parle alors de capteur multispectral, le plus souvent à trois bandes, rouge, vert et bleu (RGB), voire hyperspectral pour un capteur avec plusieurs dizaines de bandes très fines. Les multiples bandes spectrales peuvent permettre de distinguer différents composants dans l'image, par exemple une lampe à LED se différenciera d'une lampe à sodium, car elles émettent de la lumière dans des parties différentes du spectre des longueurs d'onde visibles (Figure 9).

1 Les astérisques signalent que le mot est défini dans le glossaire en fin de document.

1.2.2 - RÉSOLUTION SPATIALE ET FAUCHÉE

La **résolution spatiale** correspond à la taille du plus petit élément au sol discriminable par un pixel de l'image. Elle dépend de la dimension des pixels du capteur et des caractéristiques du système optique associé (longueur focale et altitude du satellite notamment). Plus la résolution est fine, plus le niveau de détails observé sera important (Figure 4). L'image résultante sera aussi plus volumineuse. Le volume et donc le temps de traitement de l'image augmentent avec le carré de la résolution. Ils augmentent aussi lorsque le capteur dispose de plusieurs bandes spectrales. Par exemple, sur une métropole de la taille de celle de Montpellier (rectangle englobant d'environ 900 km²), une image VIIRS (500 m de résolution, capteur monospectral panchromatique) a un volume d'environ 7 Ko, tandis qu'une image Jilin (90 cm de résolution, capteur multispectral RGB) a un volume d'environ 25 Mo, soit 2 500 fois plus.

La fauchée* est la largeur au sol de la zone observée (Figure 5). Elle est généralement liée à la résolution spatiale : plus la résolution est fine et plus la fauchée est petite, ce qui peut être une contrainte selon la taille de la zone d'intérêt.

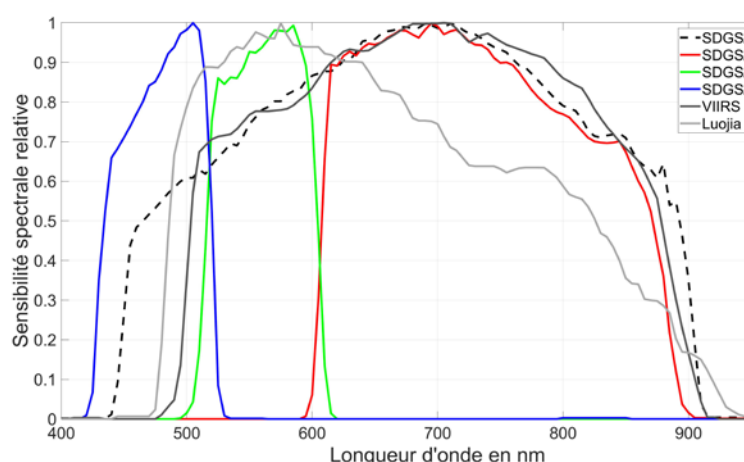


Figure 2 : courbes de sensibilité spectrale relative des capteurs équipant les satellites VIIRS, LuoJia 1-01 et SDGSAT-1

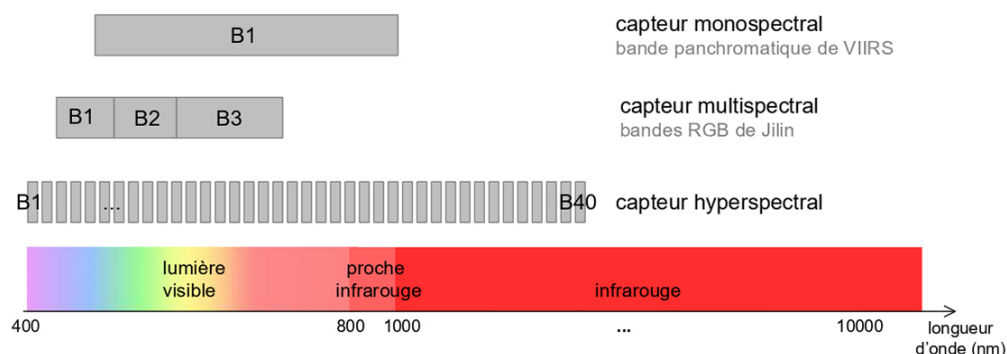


Figure 3 : illustration de capteurs satellitaires avec différentes résolutions spectrales

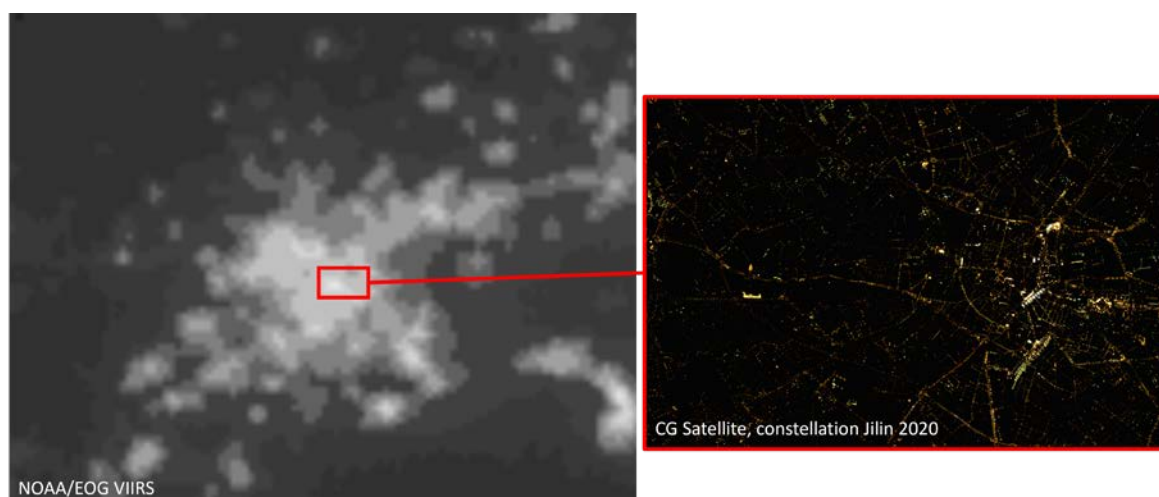


Figure 4 : illustration de la résolution spatiale sur la commune de Montpellier. À gauche : image satellitaire VIIRS, 500 m de résolution spatiale ; à droite : image satellitaire Jilin, 1 m de résolution spatiale - Sources : La TeleScop, NASA, CGSat

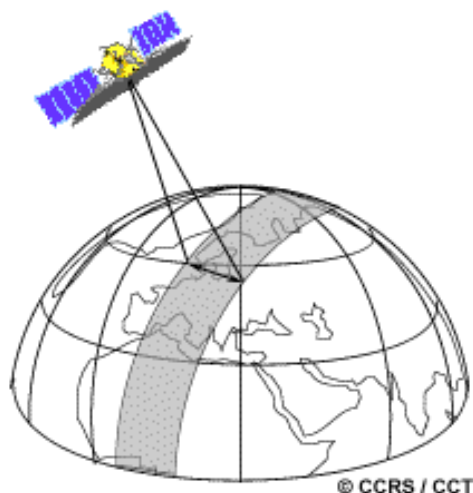


Figure 5 : illustration de la fauchée* - Source : CCRS/CCT

Dynamique de codage

Les images peuvent être codées sur 8, 12, 16 ou 32 bits, impliquant une plage dynamique plus ou moins grande, c'est-à-dire plus ou moins de nuances de couleurs. Plus le nombre de bits de codage est important, plus la donnée comporte alors de nuances lumineuses et est volumineuse. Certaines données comme VIIRS sont livrées dans un format utilisant peu de bits de codage, mais avec un facteur d'échelle (*scale factor*) à appliquer pour obtenir la donnée dans l'unité de mesure adéquate (souvent en nombres réels, donc au moins sur 16 bits de codage).

1.2.3 - RÉSOLUTION TEMPORELLE ET HEURE DE PASSAGE

La **résolution temporelle**, aussi appelée « revisite », correspond à la fréquence de passage du satellite au-dessus du même point. Une fréquence de revisite élevée permet de faire un suivi temporel régulier d'un site, sous réserve de conditions météorologiques favorables au moment de la prise de vue. À certaines périodes de l'année et selon la latitude observée, si le ciel n'est pas assez obscur, alors les images nocturnes ne sont pas exploitables (ex. : l'été en Europe du Nord).

La majorité des satellites d'observation de la Terre ont une orbite héliosynchrone : ils passent au-dessus d'un point de la surface terrestre donné à la même heure solaire locale. L'heure d'observation en temps universel (UTC) est donc relativement fixe et ne peut pas être choisie par l'utilisateur. Sur les pays pratiquant le changement d'heure, l'heure locale d'acquisition sera différente entre l'été et

l'hiver. Par exemple, en France métropolitaine, une observation satellitaire récurrente à 21 h UTC correspondra à une heure locale de 22 h en hiver et 23 h en été. Certaines constellations comme Jilin, par exemple, peuvent être constituées de satellites ayant des horaires de prises de vue différents.

N.B. Les satellites non héliosynchrones sont principalement les satellites d'observation de l'espace lointain, de télécommunications, de navigation (GPS) ou de météorologie qui sont le plus souvent géostationnaires (en permanence au-dessus du même point).

1.3. Les limites : qu'est-ce qu'un satellite ne « voit » pas ?

1.3.1 - LES SPÉCIFICITÉS DE LA NUIT

L'imagerie nocturne comporte de nombreuses spécificités. Tout d'abord, les niveaux de radiance* observés sont beaucoup plus faibles qu'en imagerie de jour (écarts de plusieurs centaines), car la luminosité de la surface terrestre est nettement inférieure. En effet, le jour, les satellites observent la lumière solaire réfléchi par la Terre, tandis que la nuit, ils observent une majorité de territoires sombres (dénusés d'éclairage) et une minorité de lumières artificielles ou naturelles, directes ou réfléchies, bien moins puissantes que le soleil (Figure 6). De plus, les sources de lumière nocturne, directe ou réfléchi, varient grandement en intensité. Il y a donc de fortes différences radiométriques à l'intérieur des prises de vue nocturnes (large plage dynamique).

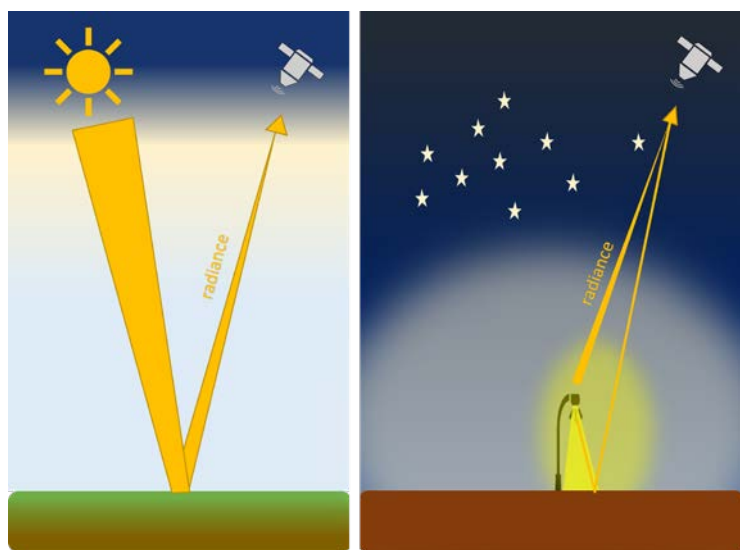


Figure 6 : spécificité de l'observation nocturne de la Terre. La radiance renvoyée par une source de lumière artificielle est très faible par rapport à la radiance renvoyée par la lumière du soleil reprojétée sur Terre, d'où la difficulté à la capter - Source : La TeleScop

En outre, les sources de lumière artificielle peuvent saturer les capteurs lorsque leur flux lumineux est directement orienté vers le ciel (projecteur éclairant un monument en contre-plongée, canon à lumière, lampadaire boule, torchère, etc.), ce qui peut entraîner une perturbation du signal à proximité de ces sources.

Les images nocturnes sont aussi sujettes à du bruit numérique* (fluctuation parasite du signal), en particulier sur les zones sombres. Des traitements de débruitage sont généralement appliqués en amont de leur livraison pour supprimer ce bruit, mais peuvent entraîner la suppression de vrais signaux ayant un niveau proche du bruit.

Enfin, le calage géométrique des images satellitaires nocturnes est généralement moins précis que celui des images diurnes. En effet, la projection des acquisitions satellitaires sur le globe terrestre est réalisée grâce à la connaissance précise du positionnement et de l'orientation du satellite au moment de l'acquisition, grâce à un viseur d'étoiles. Cependant, cette localisation « a priori » comporte des biais, corrigés sur les images diurnes grâce à des points d'amers* (points de repère sur la surface terrestre identifiables sans ambiguïté). Trouver des points d'amers stables est beaucoup plus complexe de nuit, car l'éclairage nocturne n'est pas fixe, et cette étape de correction de la localisation n'est souvent pas réalisée sur les images nocturnes.

1.3.2 - LES INCERTITUDES LORS DE LA PRISE DE VUE

1.3.2.1. EFFETS GÉOMÉTRIQUES

Les acquisitions à haute résolution spatiale (Jilin, par exemple) sont rarement réalisées au nadir*, c'est-à-dire à l'aplomb de la zone d'étude. L'angle de prise de vue peut dans ce cas engendrer le masquage de sources lumineuses par les bâtiments, la végétation ou le relief (Figure 7), ou au contraire dévoiler certaines sources qui ne seraient pas visibles au nadir* (éclairage sous un pont, par exemple). Cela

peut compliquer les comparaisons temporelles entre plusieurs acquisitions et biaiser les moyennes d'images acquises sous différents angles. Cet effet de masquage lié à l'angle d'acquisition peut aussi exister sur les bords des images à basse résolution issues de capteurs à large champ de vision (DMSP ou VIIRS, par exemple), du fait de leur très large fauchée* (plusieurs centaines de kilomètres).

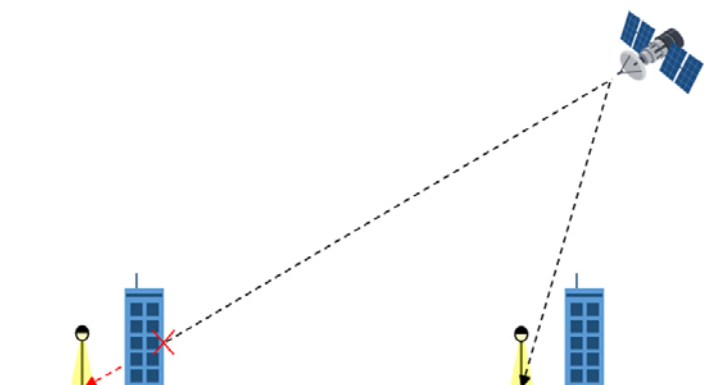


Figure 7 : schéma de l'acquisition satellitaire selon différents angles de vue, impliquant parfois un effet de masquage des sources lumineuses

1.3.2.2. FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

Les incertitudes de mesure de la radiance nocturne vue du ciel proviennent aussi de plusieurs facteurs environnementaux et de variations saisonnières. Les principales sources d'erreurs incluent les perturbations induites par les aérosols et les nuages, la lumière de la Lune, les aurores boréales ou australes dans les hautes latitudes et les variations saisonnières de la végétation.

Premièrement, les nuages opaques peuvent bloquer complètement la radiance, tandis que les atmosphères plus fines peuvent la diffuser, créant une apparence floue et élargissant les taches lumineuses. Deuxièmement, les capteurs mesurent à la fois de la lumière directe ou réfléchie. Les variations de l'albédo* (pouvoir réfléchissant) des surfaces influencent donc ces mesures.

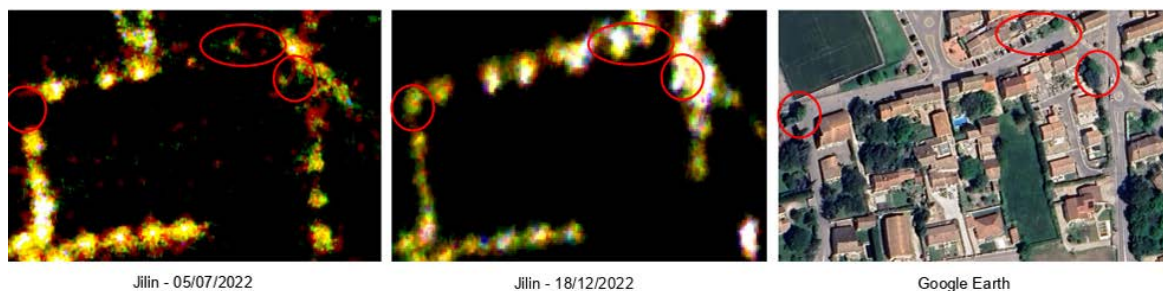


Figure 8 : de gauche à droite : images nocturnes Jilin du 05/07/2022 et du 18/12/2022 © CGSat, La Telescop ; image diurne Google Earth sur la commune de Mollégès (Bouches-du-Rhône). En été, la canopée de certains arbres masque la lumière émise et réfléchie issue des lampadaires voisins

Enfin, la couverture végétale peut obstruer la lumière émise ou réfléchi au sol, réduisant ainsi la radiance observée depuis le ciel. Les changements saisonniers des canopées de feuillus par exemple induisent des différences saisonnières dans les observations (Figure 8).

Ces incertitudes sont cruciales à caractériser, ou au minimum à prendre en compte dans l'estimation de la fiabilité de la donnée, car elles influencent la captation des lumières nocturnes et ne peuvent pas être directement corrigées à partir des radiances observées. Pour corriger les effets de l'atmosphère, il est nécessaire d'utiliser un modèle de transfert radiatif afin de compenser les impacts des aérosols, de la vapeur d'eau et de l'ozone sur les radiances. Actuellement, seuls les produits issus des acquisitions basse résolution réalisées via l'instrument VIIRS font l'objet de corrections des effets de l'atmosphère, de la lumière de la Lune [1], voire même de l'albédo* de surface et des variations saisonnières pour les produits Black Marble [2] de la NASA. Ces corrections sont permises grâce à des systèmes de mesure embarqués sur le satellite. Des masques de nuages sont également fournis avec la donnée VIIRS.

Pour les autres données satellitaires, l'identification des nuages doit être réalisée par une inspection visuelle ou via des données auxiliaires de météo, par exemple. En l'absence de calibration radiométrique (SDGSAT, Jilin, etc.), la comparaison d'images prises à différentes dates est complexe et doit être réalisée à partir des valeurs relatives constatées sur le territoire et non des valeurs absolues de radiance. La connaissance de l'albédo* des surfaces éclairées peut permettre de corriger les effets réfléchissants. Enfin, l'impact de la couverture végétale n'est généralement pas considéré, mais il pourrait être pris en compte via des bases de données auxiliaires de végétation (densité, distribution verticale, saisonnalité).

D'autre part, sur les images nocturnes sont présentes à la fois des sources fixes (lampadaires) et mobiles (phares de voitures). En zone rurale ou non éclairée, des pixels lumineux peuvent être liés au trafic routier, à l'éclairage privé [3], ou être des artefacts en valeurs faibles de radiance (bruit* du capteur).

1.3.3 - LIMITES LIÉES À L'HEURE D'ACQUISITION

L'éclairage artificiel nocturne subit des changements saisonniers mais aussi des variations dynamiques au cours d'une même nuit. Les observations montrent une diminution typique de la luminosité du ciel nocturne d'environ 5% par heure, due à la réduction des activités humaines, avec des baisses plus importantes en début de nuit [4]. Beaucoup de municipalités réduisent ou éteignent l'éclairage

public plus ou moins tard dans la nuit, et parfois à différentes heures selon les jours de la semaine, ce qui entraîne des baisses significatives de la radiance nocturne observée. De plus, le spectre des émissions lumineuses artificielles tend à changer au fil de la nuit, probablement en raison des variations dans le type de lampes utilisées (des sources privées plus variées en début de nuit que l'éclairage public plus harmonisé le reste de la nuit) [4]. La plupart des capteurs satellitaires font des prises de vue à heure fixe et sont donc incapables de rendre compte de la variation de lumière au sol au cours de la nuit.

D'autre part, en été et aux latitudes de la France, certains satellites d'observation de la Terre peuvent recevoir une part minime de rayonnement solaire qui peut perturber leur mesure [4]. Sur certains satellites (VIIRS), une correction du *straylight* (lumière parasite dans l'instrument provenant du Soleil ou de la Terre) est appliquée. Sur d'autres (Jilin ou SDGSAT), il n'y a pas de prises de vue disponibles entre mai et juillet sur la France continentale.

1.3.4 - PASSAGE AUX LED

La dynamique de rénovation de l'éclairage est forte en France et largement appuyée sur un passage massif aux LED, ce qui a des implications fortes pour la télédétection de l'éclairage nocturne. Premièrement, les LED « blanches » (3000-4000 K) massivement utilisées pour l'éclairage extérieur ont un spectre large, avec un pic dans le bleu, contrastant fortement avec le spectre des lampes à vapeur de sodium haute pression (SHP) de couleur orange (Figure 9). Les instruments satellitaires ayant une faible sensibilité dans le bleu peuvent donc induire une confusion entre un passage aux LED et une diminution de la lumière émise. La part d'énergie non mesurable peut atteindre 17% (cf. encart ci-contre).

Le parc d'éclairage public en France est actuellement constitué d'environ 30% de LED [5], et ce chiffre tend à augmenter; cette considération n'est donc pas anodine.

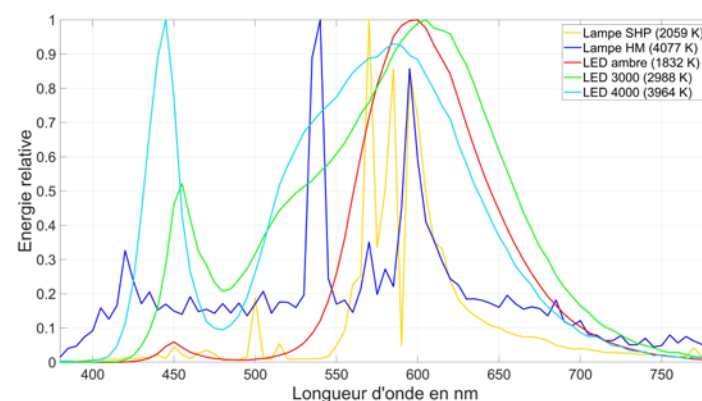


Figure 9 : spectres d'émission d'une lampe à sodium haute pression (SHP), à halogénure métallique (HM), d'une LED ambre et de LED « blanches » classiquement utilisées en éclairage public

Impact de la sensibilité spectrale du capteur sur les mesures de radiance selon le type de source d'éclairage

La sensibilité spectrale des capteurs satellitaires a un impact direct sur les mesures de radiance selon le type de source d'éclairage. En effet, le domaine de longueurs d'onde accessibles au capteur ne couvre pas toujours l'ensemble des longueurs d'onde émises par les sources d'éclairage. La Figure 10 illustre ce propos pour le satellite VIIRS en comparant deux types de source : une lampe sodium haute pression (2059 K) et une LED blanche (3964 K). La partie grisée entre 380 nm et 470 nm correspond aux longueurs d'onde non couvertes par la bande panchromatique du satellite. Une part non négligeable de la radiance émise par la LED blanche n'est pas mesurable par le satellite (17 % ici, totalité du pic bleu de la LED).

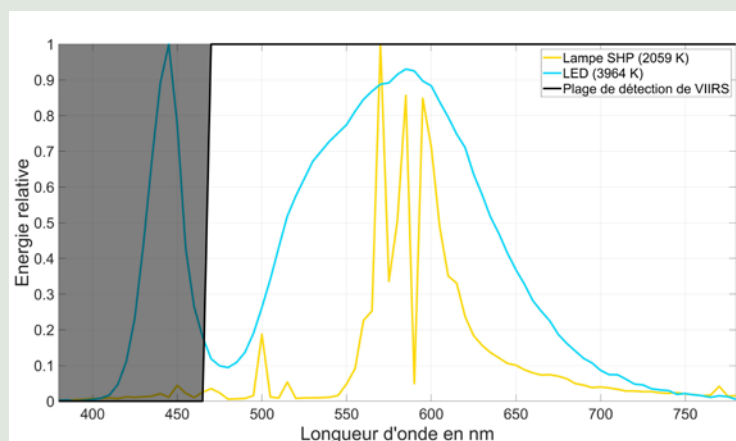


Figure 10 : illustration des spectres « vus » par le satellite VIIRS pour une lampe SHP et une LED blanche

Le Tableau 1 ci-dessous compare pour les différents types de sources représentées dans la Figure 8, le pourcentage de radiance mesurable entre 380 nm et 780 nm avec trois systèmes d'imagerie satellitaire (VIIRS, Luoja 1-01 et SDGSAT-1). Seule la partie visible du spectre a été considérée ici.

Tableau 1 : pourcentages de radiance mesurable par les satellites VIIRS, Luoja 1-01 et SDGSAT-1 selon le type de source d'éclairage

	VIIRS	Luoja 1-01	SDGSAT-1 PAN	SDGSAT-1 RGB
SHP	97 %	97 %	99 %	99 %
HM	83 %	82 %	89 %	95 %
LED ambre	99 %	99 %	100 %	100 %
LED 3 000	92 %	91 %	99 %	100 %
LED 4 000	83 %	82 %	95 %	100 %

D'autre part, l'atmosphère interagit davantage avec la lumière bleue qu'avec le reste du spectre [4]. En effet, le phénomène de diffusion de Rayleigh stipule que les courtes longueurs d'onde (bleues) sont plus fortement diffusées dans l'atmosphère que les grandes longueurs d'onde (rouges). Les modèles de correction atmosphérique doivent donc évoluer pour mieux prendre en compte la lumière émise par les LED « blanches ».

Néanmoins, la réglementation française vise aujourd'hui à limiter la température de couleur des nouvelles installations d'éclairage à LED [7]. Les LED actuelles, tendant vers le blanc chaud, émettent moins de lumière dans le bleu, ce qui minimise la radiance non perçue par les capteurs satellitaires.

La rénovation d'installations d'éclairage existantes en technologie LED peut également s'accompagner d'un abaissement des niveaux lumineux. Les tronçons routiers équipés de LED à faible puissance sont souvent très peu visibles sur les images satellitaires (Figure 11). Notons aussi que la technologie LED est généralement moins énergivore que la technologie remplacée (majoritairement HM ou SHP), ce qui permet de réduire l'énergie consommée à énergie lumineuse produite équivalente.

Les LED sont également plus facilement modulables (intensité du flux lumineux variable et commandé) que les lampes à décharge, ce qui implique davantage de variations temporelles de l'éclairage et qui peut impacter les analyses d'images satellitaires nocturnes.

Enfin, les LED permettent de mieux concentrer le faisceau lumineux grâce à la présence de microlentilles. Ils sont moins susceptibles d'émettre de la lumière dans l'atmosphère et pourraient entraîner moins d'émissions totales grâce à une meilleure orientation des flux lumineux et une puissance plus faible (Figure 12). La réglementation est d'ailleurs actuellement plus stricte quant à l'orientation des sources lumineuses.

Notons aussi que le passage aux LED n'est pas neutre en termes d'impacts écologiques. Si d'un côté les avantages des LED cités ci-avant peuvent permettre de limiter les effets négatifs de l'éclairage sur l'environnement, d'un autre côté, les longueurs d'onde bleues, plus présentes dans la technologie LED actuelle (teintes froides en particulier) que dans les lampes SHP, sont identifiées dans la littérature scientifique comme très impactantes sur une majorité d'espèces animales. Elles influencent notamment la production de la mélatonine ou de ses équivalents dans le règne animal, responsables du calage de l'horloge circadienne [6]. D'où l'intérêt de s'orienter dorénavant vers les LED à plus basses températures de couleur (teintes chaudes), moins impactantes pour la biodiversité [7], cf. fiches AUBE n°1 [8] et n°3 [9].

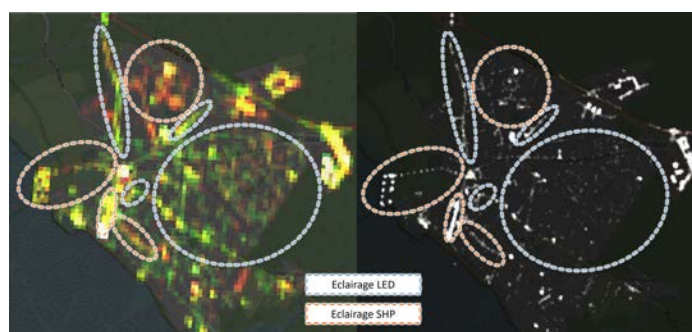


Figure 11 : images SDGSAT (40m RGB à gauche, 10m panchromatique à droite) capturées sur la commune d'Arès en septembre 2023. On constate sur l'image panchromatique (444-910 nm) que la configuration de l'éclairage (orientation, puissance) ainsi que le revêtement au sol influent beaucoup plus sur le niveau global de radiance perçue que la technologie du luminaire (SHP ou LED)



Figure 12 : à gauche : éclairage SHP ; à droite : éclairage LED. La directionnalité de l'éclairage à LED est mieux maîtrisée. Crédit photo : Samuel Busson

1.4. Synthèse des avantages et inconvénients de l'imagerie satellitaire par rapport aux autres sources de données pour l'analyse de l'éclairage nocturne

Tableau 2 : synthèse des avantages et inconvénients de différentes sources de données pour caractériser la pollution lumineuse. Adapté de Deverchère et al., 2018 [10]

	Axe spatial	Axe temporel	Axe spectral
Images satellite	++ Bonne localisation de l'éclairage non limitée à l'éclairage public (en fonction de la résolution spatiale) ++ Large emprise	-- Difficultés à réaliser des relevés fréquents ou à différentes heures de la nuit + Acquisitions fréquentes et historiques	~ Capteurs multispectraux, mais limitations dues aux bandes spectrales utilisées
Images aériennes/ drone/ballon-sonde	++ Bonne localisation de l'éclairage non limitée à l'éclairage public ~ Emprise de la zone restreinte	++ Possibilité de réaliser des relevés fréquents ou à différentes heures de la nuit	~ Limitations dues aux bandes spectrales utilisées
Sources lumineuses géolocalisées	++ Très bonne localisation de l'éclairage - Manque de données, notamment l'éclairage privé et public hors voirie - Mise à jour peu fréquente	+ Possibilités de mises à jour fréquentes, informations sur l'extinction dans les bases de données locales	++ Connaissance des lampes utilisées au niveau des points lumineux
Extrapolation à partir de données démographiques	-- Pas de localisation précise de l'éclairage	- Pas de prise en compte des données d'extinction	- Pas de données disponibles sur la nature spectrale de la pollution
Extrapolation à partir de données d'occupation des sols	~ Assez bonne localisation de l'éclairage, à large maille	- Prise en compte limitée de la variabilité temporelle	- Pas de données disponibles sur la nature spectrale de la pollution

Le **Tableau 2** compare les différentes sources de données mobilisables pour l'étude de la pollution lumineuse. On constate que l'imagerie satellitaire est la plus avantageuse du point de vue de la localisation des sources lumineuses, de la surface imagée et de la profondeur historique. L'existence de capteurs multispectraux permet de discriminer les types de sources. Du point de vue du coût, l'imagerie satellitaire est souvent beaucoup plus avantageuse que l'imagerie aérienne ou drone, car la plupart des acquisitions à moyenne résolution sont gratuites ou peu onéreuses. Ce n'est pas forcément le cas pour des études très locales (quartier, rue ou ensemble de rues) nécessitant une maille très fine, où l'imagerie aérienne ou drone est plus adaptée au besoin et présente un coût abordable.

Afin d'avoir une analyse de la pollution lumineuse la plus fine possible, l'idéal est d'associer l'imagerie satellitaire avec d'autres sources de données disponibles sur le territoire (bases de données d'éclairage public, occupation et usage du sol). Ces informations sont complémentaires et permettent d'avoir une analyse exhaustive du niveau et de l'origine de la pollution lumineuse. L'éclairage privé est une source majeure de pollution lumineuse, sa détection par imagerie satellitaire ou aéroportée est un atout majeur par rapport aux bases de données d'éclairage public.

Ce qu'il faut retenir

Les principaux avantages et inconvénients de l'observation satellitaire pour l'éclairage artificiel nocturne sont :

• Avantages

- Données disponibles sur le monde entier
- Données fiables, homogènes, objectives
- Bonne précision de la localisation de l'éclairage
- Visualisation de l'éclairage public et privé
- Suivi temporel possible grâce aux acquisitions historiques (depuis les années 1960)
- Gratuité (sauf pour les images à très haute résolution spatiale)

• Inconvénients

- Faibles niveaux de radiance des images nocturnes
- Bruit numérique
- Incertitudes géométriques
- Heure de passage fixe
- Mauvaise détection de la lumière bleue émise par les LED
- Effets géométriques liés aux angles de vue
- Impact des facteurs environnementaux (nuages, aérosols, lumières parasites)

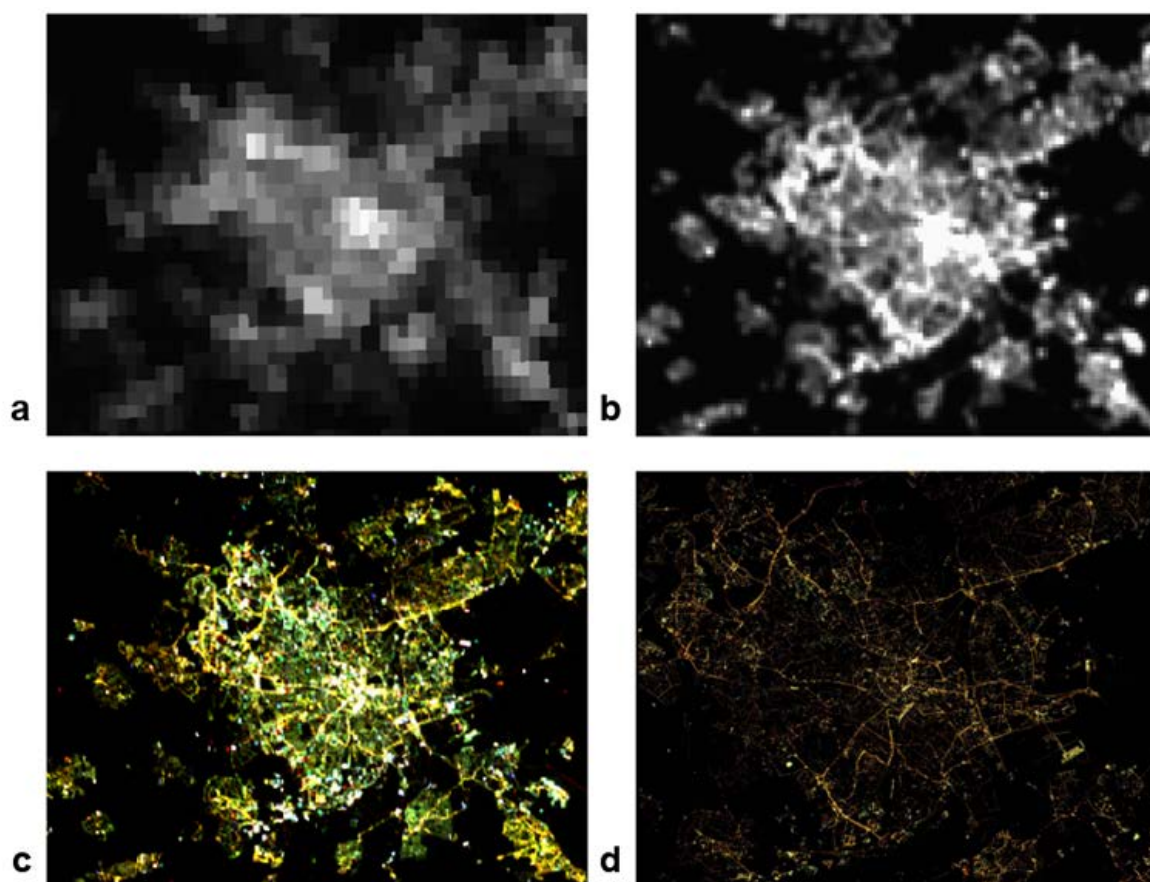


Figure 13 : acquisitions satellitaires nocturnes sur la ville de Montpellier, a) VIIRS © NASA, 07/2022, b) Luojia 1-01, 06/2022 © CGSat, c) SDGSAT 1-01, 09/2023 © CAS, d) Jilin, 08/2020 © CGSat, La Telescop

2 • ANALYSE ET COMPARAISON DES PRINCIPAUX SATELLITES NOCTURNES

Il existe de nombreux opérateurs de satellites, certains sont publics, d'autres privés. Le [Tableau 3](#) ci-dessous décrit les spécifications des principaux satellites nocturnes existants. Les satellites publics dont l'accès est gratuit sont décrits plus précisément dans les paragraphes qui suivent.

Tous ces capteurs ont des caractéristiques spécifiques ; il est donc compliqué de comparer les données entre elles et de les regrouper en longues séries temporelles.

Tableau 3 : synthèse des spécifications des principaux satellites optiques nocturnes d'observation de la Terre

Capteur	Agence spatiale	Résolution spatiale	Fauchée*	Bandes spectrales	Période temporelle	Revisite	Heure d'acquisition sur la France	Conditions d'accès
DMSP/OLS	NOAA	2.7 km	3 000 km	VIS (400-1 100 nm) IRT (10,0-13,4 µm)	1992-2013	1 jour	variable	gratuit
NPP/VIIRS	NASA/ NOAA	~750 m (400 m sur la France métropolitaine)	3 000 km	PAN (500-900 nm)	2011-...	1 jour	1 h-2 h UTC	gratuit
Luojia 1-01	Univ. de Wuhan / CGSat	130 m	250 km	PAN (460-980 nm)	2018	3 jours (mais acquisitions sporadiques)	21 h-22 h UTC	gratuit
SDGSAT-1	CAS	PAN : 10 m	300 km	PAN (444-910 nm) R (600-894 nm) G (506-612 nm) B (424-526 nm)	2021-...	11 jours	20 h-21 h UTC	gratuit, recherche uniquement
Jilin	CGSat	RGB : 40 m	41 km	PAN (460-980 nm) R (580-723 nm) G (489-585 nm) B (437-512 nm)	2017-...	9 jours	~20 h-23 h UTC	payant (~25 €/km ²)
EROS-B	Israel Aircraft Industries	90 cm – 2 m	7 km	PAN (500-900 nm)	2006-...	7 jours	variable	payant (~6 \$/km ²)

Des extraits d'images prises avec différents satellites sur la ville de Montpellier sont présentés dans la [Figure 13](#). À noter qu'il existe aussi des extraits nocturnes avec Landsat-8 et -9 (NASA), mais dont la sensibilité ne permet pas une analyse poussée de l'éclairage nocturne.

2.1. DMSP/OLS

DMSP/OLS (*Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System*) [11] est un programme de satellites américains de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) ayant acquis des données entre 1992 et 2013. Il opère notamment de nuit dans le domaine du visible et du proche infrarouge (400 - 1100 nm) et de l'infrarouge thermique (10,0 - 13,4 μm). Sa fréquence de revisite est journalière. Il fournit des images nocturnes à 2,7 km de résolution spatiale, disponibles gratuitement.

Les données issues de ce satellite ont été traitées par la *Colorado School of Mines* et peuvent être téléchargées sur le portail du groupe d'observation de la Terre².

Ces données permettent de faire un suivi historique et régulier de l'éclairage nocturne de 1992 à 2013, mais leur basse résolution spatiale ne permet pas de faire des analyses locales précises.

2.2. NPP/VIIRS

L'instrument VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) [12] embarqué sur les satellites Suomi NPP (*National Polar-orbiting Partnership*) est un radiomètre de la NOAA et de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) qui opère de nuit dans le domaine du visible et du proche infrarouge (500 - 900 nm). Il fournit des images nocturnes à 750 m de résolution spatiale à l'équateur (~460 m x 320 m sur la France métropolitaine). Les données sont accompagnées d'un masque de nuages. Il a été lancé en 2011 et est toujours opérationnel, fournissant des données nocturnes actuelles et gratuites. Sa fréquence de revisite est journalière. Son heure d'acquisition au-dessus de la France métropolitaine se situe autour d'1 h 30 UTC, soit 2 h 30 en hiver et 3 h 30 en été.

Les données journalières peuvent être récupérées sur le portail Earthdata de la NASA³. Les mosaïques mensuelles et annuelles sans nuages traitées par la *Colorado School of Mines* sont disponibles sur le portail du Groupe d'observation de la Terre⁴. La NASA propose aussi des composites mensuels et annuels⁵. Ceux-ci se différencient des produits de la *Colorado School of Mines* par les corrections radiométriques réalisées [13].

Ils incluent notamment des corrections supplémentaires (aérosols, variation saisonnière à partir de l'albédo* de surface et de la végétation).

Comme les images DMSP, les données VIIRS permettent de faire un suivi régulier de l'éclairage nocturne, mais leur basse résolution spatiale ne permet pas de faire des analyses locales précises. De plus, le satellite ne capte pas les longueurs d'onde inférieures à 500 nm, soit une partie du spectre des LED (Figure 10, Tableau 1).

2.3. Luojia 1-01

Luojia 1-01 [14] est un satellite chinois développé par l'université de Wuhan et Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd. (CGSat), lancé le 2 juin 2018. C'est le premier satellite chinois dédié à l'observation nocturne. Il a une résolution spatiale de 130 m, une fauchée* de 250 km, et une bande spectrale panchromatique qui s'étend de 460 à 980 nm. Ce satellite était un démonstrateur pour le satellite Jilin et n'a fourni des images qu'en 2018. Il est à priori toujours en orbite mais n'est plus opérationnel. Les acquisitions ont eu lieu entre 21 h et 22 h UTC, soit 22 h-23 h en hiver et 23 h-minuit en été.

Les données peuvent être récupérées sur le portail de l'université de Wuhan⁶.

Ces données sont mieux résolues que les données DMSP ou VIIRS ; elles permettent d'étudier la radiance par quartier. Les données brutes sont difficilement utilisables telles quelles.

2.4. SDGSAT-1

Le satellite SDGSAT-1 (*Satellite for Sustainable Development Goals*) [15] a été conçu pour surveiller et atteindre les objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies. Lancé en 2021 par la CAS (*Chinese Academy of Sciences*), il observe différents phénomènes terrestres via plusieurs instruments, dont un capteur dédié à l'observation nocturne, nommé GIU, pour *Glimmer Imager for Urbanization* (« imageur » de lueurs d'urbanisation). L'orbite de SDGSAT-1 est héliosynchrone et se situe à une altitude de 505 km. La largeur de

2 <https://eogdata.mines.edu/products/dmsp/>

3 <https://www.earthdata.nasa.gov/>

4 <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>

5 Produit BlackMarble disponible à l'adresse <https://blackmarble.gsfc.nasa.gov/>

6 <http://59.175.109.173:8888/>

fauchée* est de 300 km et la période de revisite est d'environ 11 jours. Les acquisitions sur la France métropolitaine du capteur GIU ont lieu entre 20 h et 21 h UTC (21 h-22 h en hiver, 22 h-23 h en été).

Le capteur GIU présente une bande panchromatique (444 - 910 nm) à 10 m de résolution spatiale et trois bandes multispectrales rouge (424 - 526 nm), verte (506 - 612 nm) et bleue (600 - 894 nm) à 40 m de résolution spatiale.

Les données peuvent être récupérées sur le portail SDGSAT⁷ développé par le CBAS (*International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals*) après soumission et acceptation d'un projet. Ces données

sont à vocation de recherche scientifique uniquement [16]. Des données sur l'Europe sont visualisables sur portail Google Earth Engine⁸ réalisé par l'équipe d'Alejandro Sanchez de Miguel de l'université Complutense de Madrid (Figure 14).

Ces données constituent un bon compromis entre résolution spatiale, revisite et gratuité. Elles permettent d'étudier la radiance à l'échelle des rues. Les images panchromatiques à 10 m de résolution peuvent être exploitées pour localiser les sources lumineuses, et les images RGB à 40 m de résolution peuvent permettre de différencier le type d'éclairage (lampe à sodium vs LED) et par exemple d'estimer le taux de conversion de l'éclairage en LED [17].

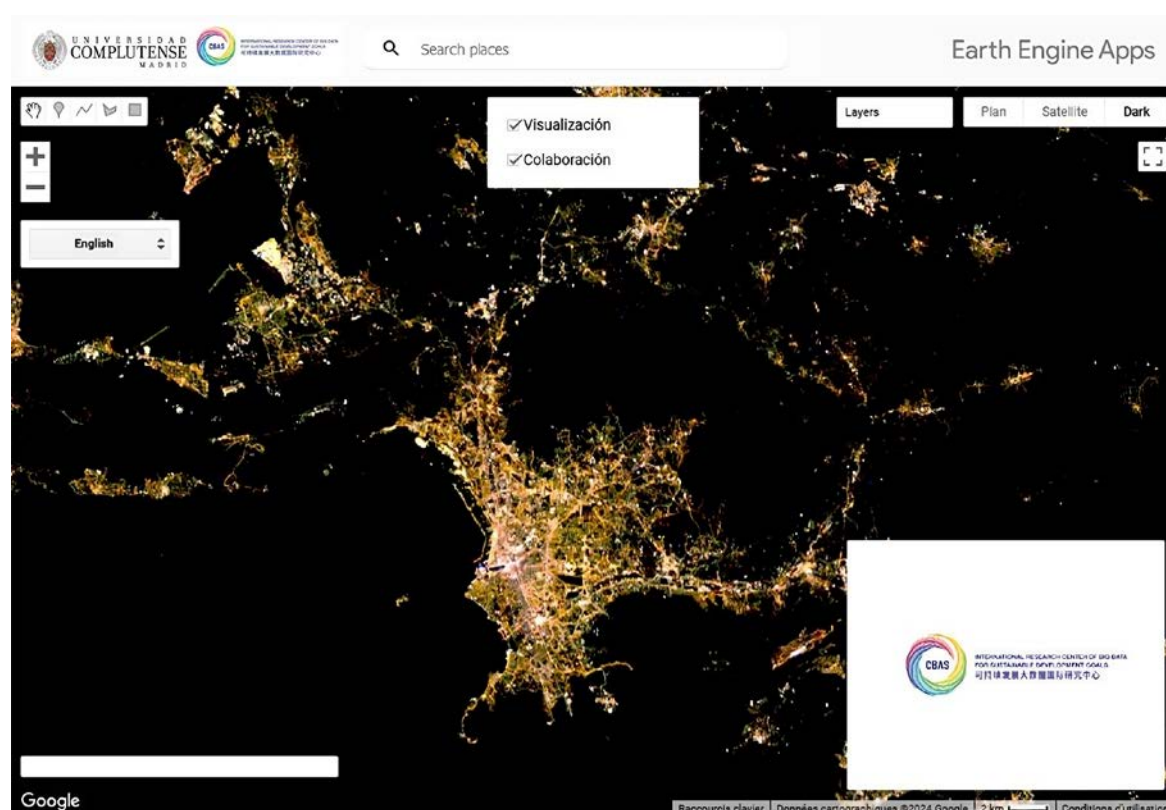


Figure 14 : Visualisation d'images SDGSAT-1 sur la région de Marseille sur Google Earth Engine.
Crédits : CBAS, université Complutense de Madrid, Google Earth Engine

7 <https://www.sdgsat.ac.cn/>

8 <https://pmisson.users.earthengine.app/view/sdgsat-eu-visual>

3 • PRODUITS ET SERVICES ISSUS DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE NOCTURNE

Des produits et services dérivés de ces satellites, plus faciles à prendre en main pour un utilisateur non initié à l'exploitation d'images brutes, sont également disponibles. Les principaux sont décrits ci-dessous.

3.1. Light Pollution Map

*Light Pollution Map*⁹ est une plateforme en ligne interactive, développée par Jurij Stare et ses collaborateurs, dédiée à la visualisation dynamique et à la cartographie de la pollution lumineuse et de la radiance nocturne à l'échelle mondiale (Figure 15). *Light Pollution Map* intègre plusieurs couches de données, notamment celles provenant des satellites VIIRS et DMSP, et une carte de pollution lumineuse (World Atlas 2015) issue des travaux de modélisation de Falchi et al. [18].

Les utilisateurs peuvent comparer les niveaux de radiance sur différentes périodes et observer les tendances temporelles annuelles, voire mensuelles (Figure 16). La plateforme offre aussi des statistiques sur les niveaux de radiance d'un pays et sur son évolution temporelle. Les utilisateurs peuvent aussi partager leurs observations et leurs initiatives pour réduire la pollution lumineuse. L'outil est facilement accessible, gratuit et intuitif pour les non-initiés (chercheurs, aménageurs, astronomes amateurs) mais en langue anglaise.

Pour aller plus loin dans l'analyse temporelle et les statistiques zonales sur les données VIIRS et DMSP, il existe aussi la plateforme *Radiance Light Trends*¹⁰ également développée par Jurij Stare et ses collaborateurs.

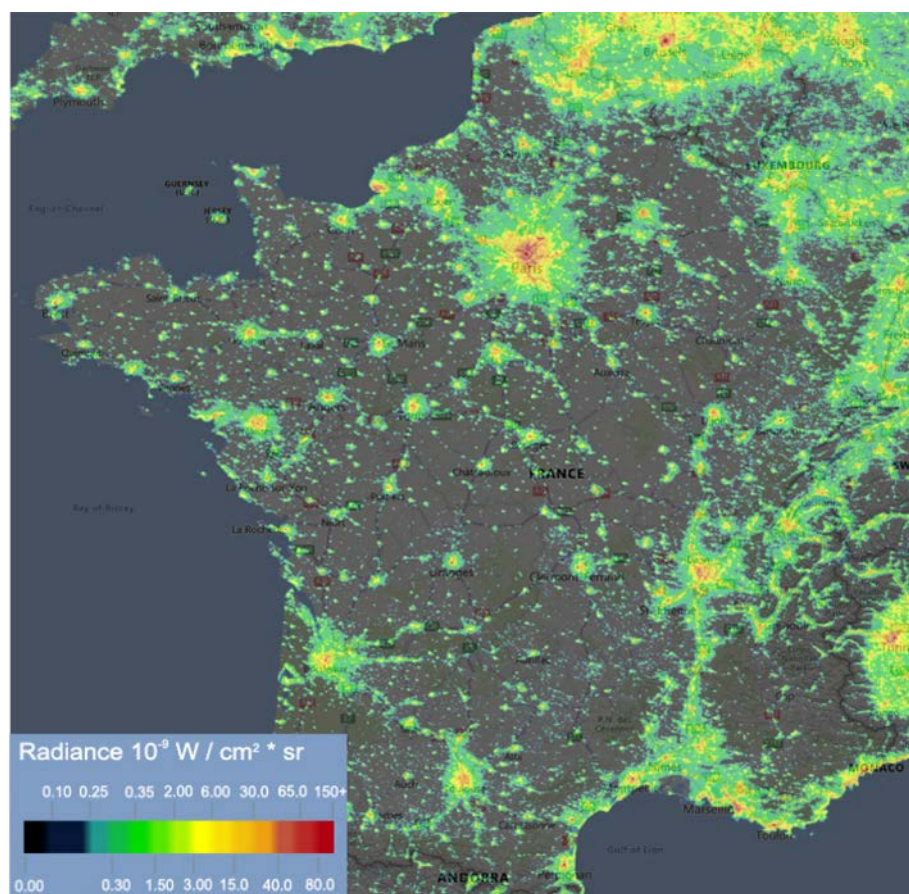


Figure 15 : radiance observée par VIIRS moyennée sur 2023 (<https://www.lightpollutionmap.info/>).
Fond de carte Bing Maps

9 <https://www.lightpollutionmap.info>

10 <https://lighttrends.lightpollutionmap.info>

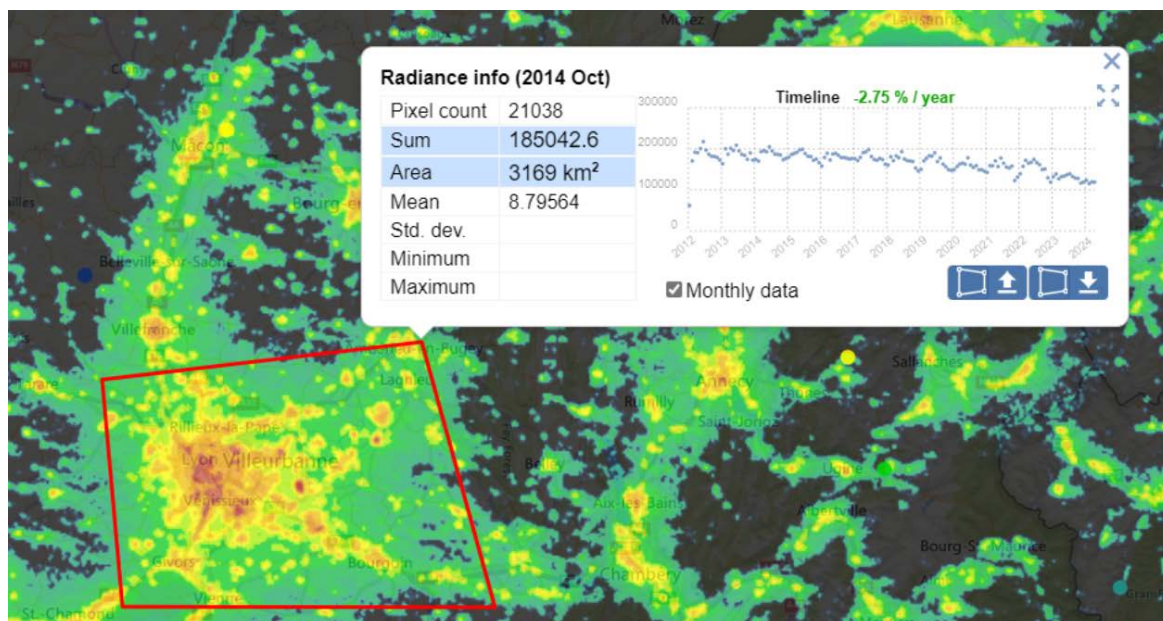


Figure 16 : séries temporelles mensuelles de radiance VIIRS depuis 2012 sur une zone englobant la métropole de Lyon (<https://www.lightpollutionmap.info/>). Fond de carte Bing Maps

3.2. Light Pollution Platform

La *Light Pollution Platform*¹¹ est une plateforme en ligne interactive et en accès libre, développée par DarkSkyLab et mise en ligne en juin 2024 (Figure 17). Elle est actuellement la seule plateforme qui permet la visualisation de la pollution lumineuse (luminance zénithale vue depuis le sol exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré - mag/arcsec²) et de la radiance nocturne vue depuis le ciel à l'échelle mondiale à partir des dernières données VIIRS disponibles (millésime 2023).

Ces observations sont gratuites et sans limitations d'usage. La plateforme propose également des services supplémentaires, dont certains sont payants, moyennant la création d'un compte.



Figure 17 : interface web de la Light Pollution Platform - Source : DarkSkyLab

11 <https://darks skylab.com/light-pollution-platform/>

3.3. Indicateur national de la pollution lumineuse (ONB, 2021)

L'indicateur national de la pollution lumineuse produit par l'Observatoire national de la biodiversité (ONB) en 2021 (Figure 18) vise à fournir une vue d'ensemble de la répartition et de l'intensité de la pollution lumineuse en France. Il permet de sensibiliser le public et les décideurs politiques à l'importance de réduire la pollution lumineuse pour préserver la biodiversité nocturne.

La cartographie s'appuie sur les données satellitaires nocturnes VIIRS (2.2). Les données ont été traitées pour éliminer les sources naturelles de lumière (comme la lune) et se concentrer sur les sources artificielles de lumière (éclairages

urbains, industriels et routiers). Des modèles de diffusion atmosphérique et de réflectivité* de surface développés par la société DarkSkyLab ont été utilisés pour estimer la luminance zénithale en tout point du territoire, c'est-à-dire la « brillance » du ciel nocturne vue depuis le sol à la verticale. Attention, cet indicateur n'est représentatif que de la situation en cœur de nuit.

Cet indicateur sera mis à jour en 2024 avec un millésime par an et sera complété avec les extrémités de nuit (car l'éclairage artificiel nocturne est maximal au début et à la fin de la nuit).

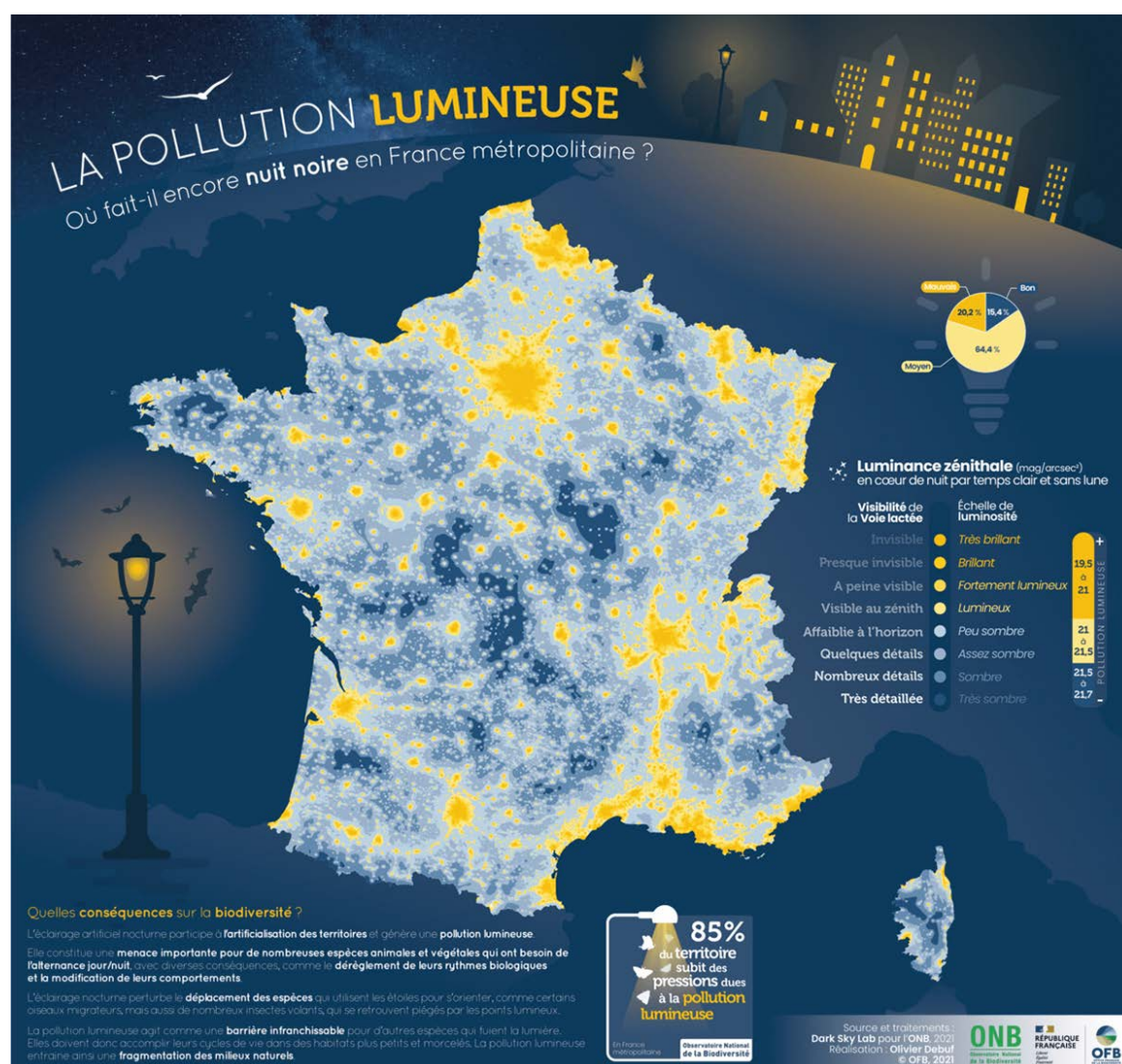


Figure 18 : cartographie nationale de la pollution lumineuse (ONB, 2021)

3.4. Cartographies départementales de l'éclairage nocturne basées sur LuoJia 1-01 (Cerema, 2024)

Le satellite LuoJia 1-01, présenté dans le paragraphe 2.3, fournit des données gratuites de radiance nocturne acquises en 2018 avec une résolution spatiale de 130 m. Ces données permettent d'étudier la radiance par quartier et de cibler les points de pression importants de l'éclairage sur la biodiversité. Cependant, les données brutes présentent de nombreux obstacles pour leur exploitation directe par les experts métier : l'orthorectification (recalage géométrique) n'est pas précise, les niveaux de radiance ne sont pas harmonisés entre les passages, les zones de bords ne sont pas clairement délimitées, les nuages ne sont pas détectés ni masqués, etc.

Le Cerema a développé une chaîne de traitement géométrique et radiométrique afin de pallier ces points bloquants. L'apport avéré de ces images post-traitées pour l'évaluation de

l'éclairage artificiel nocturne d'un territoire et de ses potentielles nuisances sur la biodiversité a conduit le Cerema à étendre ces travaux à tous les départements disponibles du territoire national (80 départements traités, 16 sont manquants à cause de l'absence d'acquisitions ou de la présence de nuages). La DGALN (Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature) a cofinancé cette production. Ces données sont disponibles pour tous, notamment pour les collectivités souhaitant analyser la radiance nocturne sur leur territoire. Elles peuvent être visualisées sur le portail Cartagene¹² et téléchargées sur data.gouv.fr¹³.

La Figure 19 présente un extrait de la cartographie basée sur les données satellitaires LuoJia 1-01 autour de l'agglomération lyonnaise. La section 4 détaille des exemples d'exploitation de ces données.

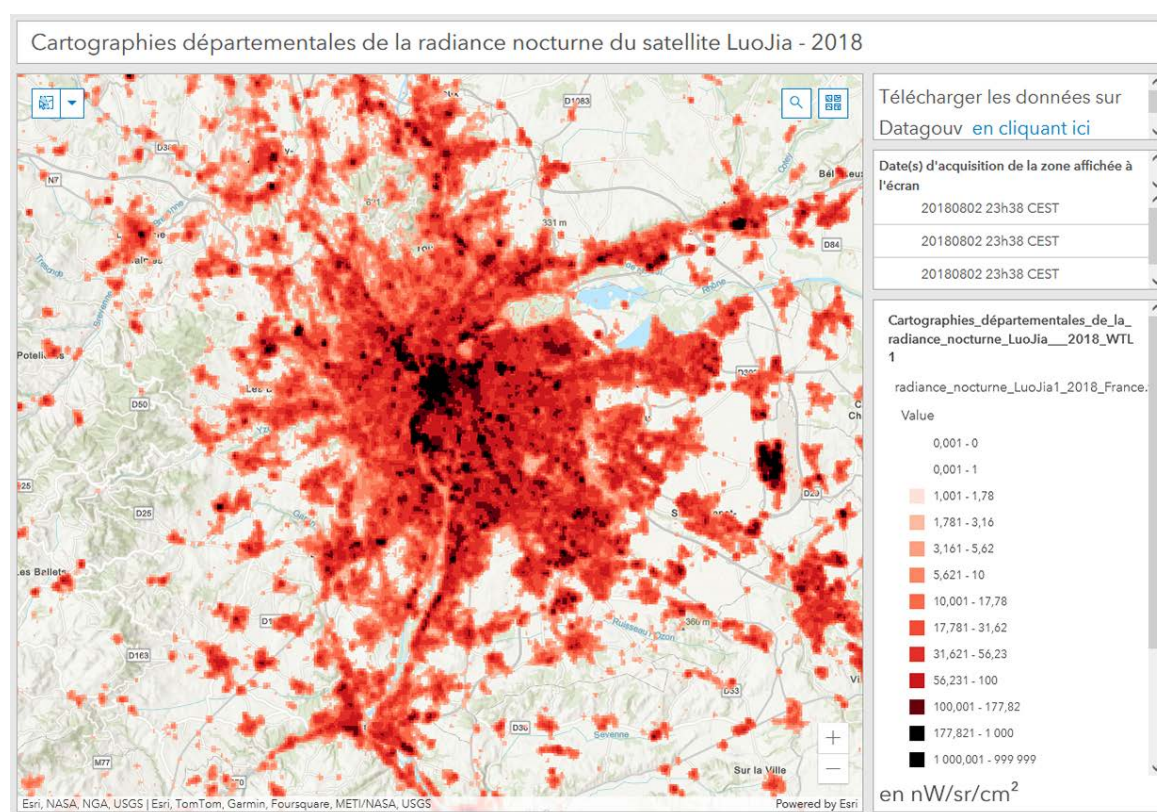


Figure 19 : radiance autour de l'agglomération lyonnaise issue de l'assemblage des prises de vue du satellite LuoJia en 2018 - Source : Cerema, fond de carte ESRI

¹² <https://cartagene.cerema.fr/portal/apps/dashboards/07c0494f288d476bb21fba536730988>

¹³ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/cartographies-departementales-de-la-radiance-nocturne-du-satellite-luojia-2018/>

Autres produits et projets existants

Le programme Cities at Night est un projet de science participative invitant le grand public à identifier le secteur géographique couvert par les photographies réalisées par les astronautes présents à bord de la station spatiale internationale (ISS). L'objectif est de compléter progressivement une photographie nocturne de la Terre en couleur (Figure 20). L'angle de prise de vue, le niveau de zoom et la qualité de la mise au point varient beaucoup au sein du lot d'images disponibles, mais on peut y trouver des images complémentaires à celles fournies par les satellites (date ou horaire non couverts par exemple).



Figure 20 : Toulouse photographié de nuit à bord de l'ISS le 20/05/2022. Photo ID ISS067-E-66996 © NASA

L'équipe du chercheur Martin Aubé basé au Cégep (Collège d'enseignement général et professionnel) de Sherbrooke (Québec, Canada) a développé un outil de modélisation de la pollution lumineuse basé sur un modèle de diffusion nommé "Illumina" qui mobilise notamment l'imagerie satellitaire nocturne¹.

Enfin, un des précurseurs des cartes de pollution lumineuse, le site internet français Avex, qui se basait historiquement sur les données d'artificialisation du sol, intègre désormais des données satellitaires de radiance nocturne, afin d'affiner les cartes proposées. Elles sont gratuites pour un usage privé et payantes pour tout usage professionnel².

1 <http://obsand.org/wiki/index.php/Prof/IllumEn>

2 <https://www.avex-asso.org>

4 • COMMENT UTILISER LES IMAGES SATELLITE POUR DES PROJETS AUTOUR DE LA TRAME NOIRE

4.1. Utilisation d'imagerie basse résolution

Les cartes de pollution lumineuse diffuse obtenues à partir d'images satellite basse résolution peuvent être croisées de manière basique avec différentes cartographies concernant la biodiversité. Un exemple est montré sur le territoire du Parc naturel régional de Brière (Figure 21). Il s'agit dans ce cas d'un simple croisement entre les cartes de pollution lumineuse dérivées de l'imagerie VIIRS avec les données du SRCE à l'échelle du Parc.

Ceci permet de quantifier le niveau de pression lumineuse (luminosité ambiante moyenne) subie par l'environnement dans une zone spécifique. Ce type de croisement est régulièrement réalisé avec différents zonages institutionnels (zones protégées, TVB, etc.) ou inventaires. Il permet de révéler des zones à enjeux prioritaires et apporte des éléments préliminaires à l'élaboration d'une trame noire*.

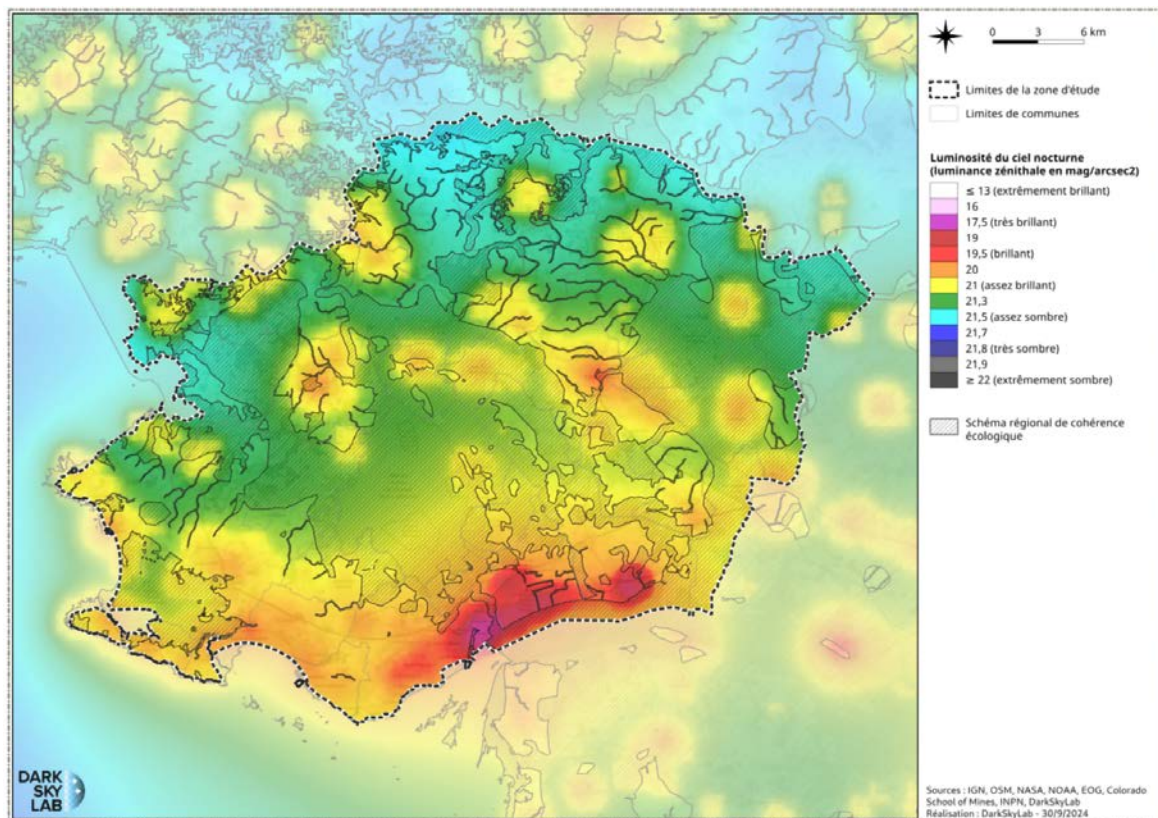


Figure 21 : croisement de la pollution lumineuse dérivée de l'imagerie satellite VIIRS et du schéma régional de cohérence écologique (SRCE) sur le parc naturel régional de Brière - Source : DarkSkyLab

4.2. Utilisation d'imagerie moyenne résolution

L'imagerie Luojia 1-01 peut permettre d'identifier les secteurs à enjeux d'un territoire, mais aussi de caractériser les parcelles les plus émettrices.

En croisant la cartographie de radiance nocturne Luojia 1-01 avec des données de biodiversité, les parcelles privées et publiques issues des fichiers fonciers par exemple, il est possible d'identifier les parcelles les plus émettrices dans les zones à fort

enjeu de biodiversité. Un exemple sur le Cap Roux (Côte d'Azur) traité dans le cadre d'un partenariat avec la Métropole de Nice Côte d'Azur est illustré en Figure 22. La collectivité peut ainsi cibler des rénovations d'éclairage public mais aussi engager des discussions avec les propriétaires des parcelles privées les plus émettrices, qui contribuent parfois au halo lumineux ou à la pollution lumineuse locale de manière significative.

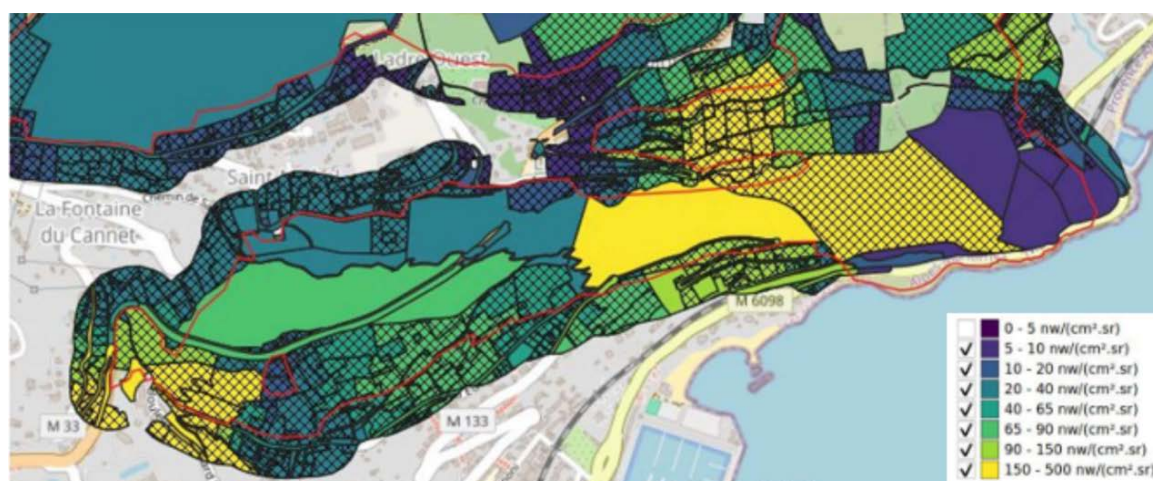


Figure 22 : radiance maximale par parcelle sur le secteur du Cap Roux, sur les zones abritant de la biodiversité (ZNIEFF¹⁴ délimitées en rouge). Les parcelles privées sont hachurées - Source : Cerema, fond de carte Open Street Map

4.3. Utilisation d'imagerie très haute résolution

L'imagerie à haute et très haute résolution spatiale permet de localiser les sources de pollution lumineuse directe en estimant la position des points d'éclairage public et privé. Le niveau de radiance donne d'autre part une indication sur le niveau de contribution de la source d'éclairage à la pollution lumineuse. La radiance mesurée dépend en grande partie de l'orientation de la source d'éclairage, mais aussi du type de source, de la puissance du luminaire, de sa photométrie (manière dont la lumière est diffusée dans l'espace par le système optique de la source) et de son environnement (réflectivité* du revêtement au sol et aux abords du point lumineux).

À partir de la localisation de ces sources d'éclairage et de données topographiques permettant de modéliser les masques visuels formés par le relief,

le bâti ou la végétation, il est possible d'estimer le nombre de sources d'éclairage visibles par un animal, à différentes hauteurs d'observation et avec différents champs de vision, et ainsi de déterminer les zones où la pression liée à la pollution lumineuse directe est la plus faible (absence de sources visibles) ou au contraire très forte.

La société coopérative et participative (SCOP) TeleScop et l'INRAE de Montpellier (UMR TETIS) avec l'appui financier de la Région Occitanie ont conduit entre 2022 et 2023 un projet innovant d'identification de la trame noire* et d'analyse de la pollution lumineuse, en utilisant des images satellites nocturnes à très haute résolution spatiale et des outils libres, sur le territoire d'étude de Montpellier Méditerranée Métropole (Figure 23).

14 Zone d'intérêt écologique, floristique et faunistique

Pour identifier la trame noire, trois analyses ont été menées en parallèle puis croisées :

- analyse de la pollution lumineuse à partir d'images satellites Jilin : localisation des sources d'éclairage et de leur contribution à la pollution lumineuse, analyse de visibilité des sources ;
- analyse des enjeux écologiques nocturnes à partir de modélisations de dispersion de groupes espèces cibles avec et sans prise en compte de

la pollution lumineuse (en partenariat avec les associations naturalistes LPO Hérault, Groupe Chiroptères Languedoc-Roussillon et OPIE¹⁵) ;

- analyse des enjeux socio-économiques via l'acceptabilité sociale de mesures de réduction (extinctions de l'éclairage en cœur de nuit).

Le détail de la méthode et des outils employés est disponible dans le rapport d'étude associé [19].

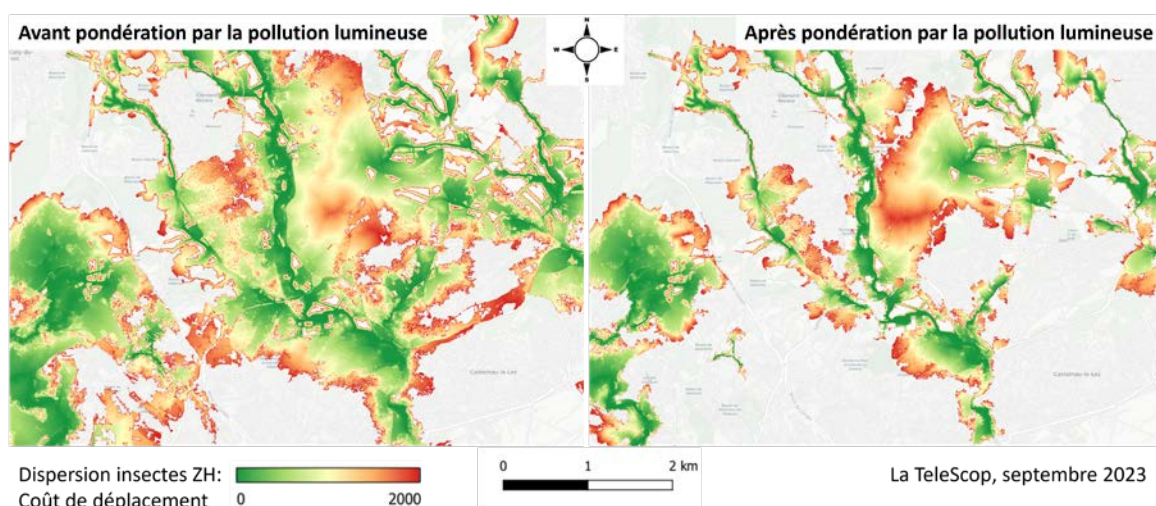


Figure 23 : carte de dispersion « sans » pollution lumineuse (gauche) et « avec » pollution lumineuse (droite), pour les insectes inféodés aux zones humides sur le secteur nord de Montpellier Méditerranée Métropole
Source : rapport d'étude POLLUM, La TeleScop [19]

CONCLUSION

La connaissance fine de l'éclairage nocturne public et privé d'un territoire est essentielle pour analyser sa trame noire et sa pollution lumineuse, en vue, potentiellement, de planifier des actions de rénovation ou de réorientation. La Stratégie nationale biodiversité 2030 prévoit d'ailleurs de diviser par deux la pollution lumineuse en France d'ici 2030, en encadrant les usages non essentiels, en facilitant les contrôles et sanctions, en déployant les trames noires sur le terrain et en soutenant le renouvellement accéléré des équipements publics [20]. Or, les bases de données locales d'éclairage public manquent cruellement d'harmonisation nationale, d'exhaustivité et de mise à jour. Une base de données nationale des éclairages publics est en cours d'élaboration.

L'imagerie satellitaire optique nocturne constitue un excellent outil d'analyse de l'éclairage nocturne, complémentaire aux autres sources de données

existantes (imagerie aérienne, drone, base de données d'éclairage public). Elle permet de visualiser l'éclairage artificiel public et privé sur de vastes territoires, de manière homogène et avec une haute répétitivité temporelle. L'accès aux données est souvent gratuit ou à tarif avantageux par rapport à l'imagerie aérienne. Cependant l'heure d'acquisition ne peut pas être choisie et il reste certains freins à son utilisation (présence de nuages pas toujours facile à détecter, bruit numérique*, difficulté d'accès et de prise en main des données).

L'offre en imagerie satellitaire nocturne est actuellement assez vaste, bien qu'étant encore un secteur de niche qui reste à développer. Des images satellitaires nocturnes sont disponibles sur le monde entier depuis les années 1960, avec une amélioration des techniques d'observation et des résolutions dans les années 2010 et 2020. Dans la

gamme d'imagerie gratuite, les données les plus utilisées actuellement présentent des résolutions de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Des missions privées proposent également des images à très haute résolution spatiale (centimétrique). L'utilisateur doit choisir la solution la plus adaptée selon les spécificités de son territoire (superficie) et les ambitions de son projet (revisite, finesse, etc.).

L'imagerie satellitaire nocturne est principalement utilisée pour distinguer les sources privées et publiques, les types de luminaires, réaliser des diagnostics, élaborer des cartes de pollution lumineuse, une trame noire, ou encore évaluer l'impact sur la biodiversité. Grâce à l'arrivée de capteurs satellitaires à haute et à très haute résolution spatiale, de nouvelles applications sont rendues possibles, notamment sur la santé humaine (lumières intrusives, indice de suppression de la mélatonine), sur l'analyse des éclairages privés pour mener des actions de sensibilisation, voire de contrôle à l'avenir, ou encore sur le suivi des consommations énergétiques [21].

De nouveaux satellites devraient arriver sur le marché dans les prochaines années, ainsi que de nouveaux produits et services. Les attentes de la communauté des utilisateurs sont fortes, et on peut citer comme besoins majeurs et

perspectives d'amélioration pour les futurs satellites d'observation nocturne de la Terre [4]:

- disposer de produits corrigés, calibrés et correctement géoréférencés;
- améliorer la correction du bruit*, qui est nettement plus élevé que sur les images satellitaires diurnes;
- disposer d'acquisitions à différentes heures (début, cœur et fin de nuit) pour s'adapter à la diversité des spécificités locales de l'éclairage public (extinctions, abaissements). Ceci pourrait être réalisé grâce à des constellations de satellites ou à une plateforme géostationnaire;
- disposer de bandes spectrales permettant d'identifier et de différencier les principaux types de lampes. La bande bleue/violette permettrait de mieux capter la lumière des LED. La bande proche infrarouge permettrait de différencier les lampes SHP des lampes HM;
- disposer d'acquisitions avec différents angles de prise de vue pour obtenir des informations sur l'atmosphère, identifier les sources de pollution lumineuse éclairant à l'horizontale, voire dans toutes les directions (vitrines, enseignes, serres et autres bâtiments vitrés par exemple) [22].

MOTS CLÉS

Pollution lumineuse, éclairage, imagerie satellitaire, trame noire.

SIGLES

CAS	Chinese Academy of Sciences	IM	Iodure métallique
CBAS	International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals	IRT	Infrarouge thermique
CGSat	Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd.	ISS	International Space Station (station spatiale internationale)
DGALN	Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature	LED	Light Emitting Diode (diode électroluminescente)
DMSP/OLS	Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System	OCS	Occupation du sol
HRL	High Resolution Layers (Copernicus)	ODD	Objectifs de développement durable
HM	Halogénure métallique	NASA	National Aeronautics and Space Administration
		NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

NPP	National Polar-orbiting Partnership	THRS	Très haute résolution spatiale
PAN	Panchromatique	UTC	Temps universel coordonné
PIR	Proche infrarouge	VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
RGB	Rouge vert bleu	VIS	Visible
SCOP	Société coopérative et participative	ZNIEFF	Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique
SHP	Sodium haute pression		
SRCE	Schéma régional de cohérence écologique		

GLOSSAIRE

Albédo (sans dimension) : Fraction de la lumière solaire réfléchiée par une surface.

Angle solide (sr) : Analogie tridimensionnel de l'angle plan. Portion de l'espace délimitée par un cône.

Bruit numérique : Fluctuation parasite ou dégradation subie par l'image lors de son enregistrement. Le bruit numérique est lié aux interférences électriques dans le capteur.

Fauchée : Largeur de la bande terrestre observée par un satellite.

Nadir : Aplomb (perpendiculaire) de la zone observée.

Point d'amer : Point de repère fixe et identifiable sans ambiguïté utilisé pour le calage géométrique des images d'observation de la Terre.

Puissance (W) : Quantité d'énergie par unité de temps.

Radiance (W.m⁻².sr⁻¹) : Puissance du rayonnement par unité de surface et par unité d'angle solide.

Réflexivité (sans dimension) : Fraction d'énergie électromagnétique réfléchiée par une surface.

Stéradian (sr) : Unité d'angle solide qui, ayant son sommet au centre de la sphère, coupe une surface sphérique égale au carré du rayon de la sphère.

Trame noire : Réseau de corridors écologiques obscurs empruntés par les espèces nocturnes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lee S., Chiang K., Xiong X., Sun C., Anderson S., « The S-NPP VIIRS Day-Night Band On-Orbit Calibration/Characterization and Current State of SDR Products », *Remote Sens.*, 2014, 6, 12427-12446, <https://doi.org/10.3390/rs61212427>
- [2] Román M. O. et al., *Black Marble User Guide* (version 1.2), NASA, september 2022.
- [3] Kyba C.C.M., Ruby A., Kuechly H. et al., « Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas », *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 2021, 53 (3), 147-156. <https://doi.org/10.1177/003591571100400621>
- [4] Levin N., Kyba C.C.M., Zhang Q., Sánchez de Miguel A., Román M.O., Li X., Portnov B.A., Molthan A.L., Jechow A., Miller S.D., Wang Z., Shrestha R.M., Elvidge C.D., « Remote sensing of night lights : A review and an outlook for the future », *Remote Sensing of Environment*, vol. 237, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111443>
- [5] https://www.afe-eclairage.fr/?page_id=3682

- [6] Rapport 2021 de l'Académie nationale de médecine : « Pollution lumineuse et santé publique », <https://www.academie-medecine.fr/wp-content/uploads/2021/07/RAPPORT-POLLUTION-LUMINEUSE.pdf>
- [7] Arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000037864346>
- [8] « AUBE - Aménagement, urbanisme, biodiversité, éclairage : fiche n° 1 - Adapter l'éclairage aux enjeux de biodiversité du territoire », Cerema Bron, 2020.
- [9] « AUBE - Aménagement, urbanisme, biodiversité, éclairage : fiche n° 3 - Choisir une source d'éclairage en considérant l'impact de son spectre lumineux sur la biodiversité », Cerema, Bron, 2020.
- [10] Deverchère P., Vauclair S., Bonavitacola M., « Mesure et modélisation de la pollution lumineuse », DarkSkyLab, 2018.
- [11] Nichols D.A., « The Defense Meteorological Satellite Program », Optical Engineering 14 (4), 144273, 1975, <https://doi.org/10.1117/12.7971832>
- [12] Murphy R.E., Ardanuy P., Deluccia F.J., Clement J.E., Schueler C.F., « The Visible Infrared Imaging Radiometer Suite », in Qu J.J., Gao W., Kafatos M., Murphy R.E., Salomonson V.V. (eds) « Earth Science Satellite Remote Sensing », Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37293-6_11
- [13] Yuan M., Li X., Li D., Wu J., « An Analysis of Environmental Effect on VIIRS Nighttime Light Monthly Composite Data at Multiple Scales in China », IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, vol. 16, 2023.
- [14] « The Luojia-1A Scientific Experimental Satellite Was Successfully Launched », Wuhan University. Accessible en ligne : <http://www.lmars.whu.edu.cn/enluojia-1a-scientific-experimental-satellite-launched/>
- [15] « SDGSAT-1 Data Users Handbook (Draft) », International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals (CBAS), 2022.
- [16] « Regulations of the Use of SDGSAT-1 Data », International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals (CBAS), 2022.
- [17] Yin Z., Chen F., Dou C., Wu M., Niu Z., Wang L., Xu S., « Identification of illumination source types using nighttime light images from SDGSAT-1 », International Journal of Digital Earth, 17, 2023. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2297013>
- [18] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B., Rybnikova N. A., Furgoni R., « Supplement to : " The New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness" », GFZ Data Services, 2016. <http://doi.org/10.5880/GFZ.1.4.2016.001>
- [19] Potin S., Chaurand J., Beaudet C. et Tardieu L., « Création d'un outil d'aide à la définition de la trame noire à partir d'images satellites nocturnes à très haute résolution », La TeleScop, UMR TETIS, 500 rue Jean-François Breton, 34000 Montpellier, 2024. <https://hal.science/hal-04690665>
- [20] Stratégie nationale biodiversité 2030 <https://biodiversite.gouv.fr/la-strategie-nationale-biodiversite-2030>
- [21] Chen F., Wang L., Wang N., Guo H., Chen C., Ye C., Dong Y., Liu T., Yu B., « Evaluation of road network power conservation based on SDGSAT-1 glimmer imagery », Remote Sensing of Environment, vol. 311, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114273>
- [22] Kyba C.C.M., Aubé M., Bará S., Bertolo A., Bouroussis C.A., Cavazzani S. et al., « Multiple angle observations would benefit visible band remote sensing using night lights », Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 127, 2022, <https://doi.org/10.1029/2021JD036382>

La série de fiches

« AUBE - Aménagement, urbanisme, biodiversité, éclairage »

- Fiche chapeau : Intégrer la biodiversité dans la planification et la maintenance de l'éclairage
- Fiche n° 1 : Adapter l'éclairage aux enjeux de biodiversité du territoire
- Fiche n° 2 : Intégrer les enjeux de biodiversité nocturne dans la planification et les outils opérationnels
- Fiche n° 3 : Choisir une source d'éclairage en considérant l'impact de son spectre lumineux sur la biodiversité
- Fiche n° 4 : Comprendre l'arrêté ministériel du 27 décembre 2018 relatif aux nuisances lumineuses
- Fiche n° 5 : Normes, réglementations et recommandations en éclairage public
- Fiche n° 6 : Concevoir et gérer une installation d'éclairage pour limiter la pollution lumineuse
- Fiche n° 7 : Moduler l'éclairage artificiel : acceptabilité sociale et responsabilités de chacun
- Fiche n° 8 : Financer un projet d'éclairage intégrant biodiversité et sobriété énergétique
- **Fiche n° 9 : Utiliser l'imagerie satellitaire pour analyser l'éclairage nocturne**

LE CEREMA, DES EXPERTISES AU SERVICE DES TERRITOIRES

Le Cerema est un établissement public qui apporte son expertise pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires. Présent partout dans l'Hexagone et dans les Outre-mer grâce à ses 27 implantations, il accompagne les collectivités dans la réalisation de leurs projets. Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Téléchargez nos publications sur doc.cerema.fr

UTILISER L'IMAGERIE SATELLITAIRE POUR ANALYSER L'ÉCLAIRAGE NOCTURNE



DKosig/iStock

CONTRIBUTEURS

Emma Bousquet, Aurélien Mure, Florian Greffier, Samuel Busson (Cerema)
Bastien Nguyen, Sarah Potin (La TeleScop)
Sébastien Vauclair, Philippe Deverchère (DarkSkyLab)

RELECTEURS

Jean-François Bretaud, Romuald Jobert, Matthieu Iodice, Arnaud Ceyte (Cerema)
Nicolas Cornet (Institut Paris Région)
Sylvie Varès (Pôle métropolitain du Genevois français)
Tom Brunelle (La TeleScop)
Rémy Osello (BL évolution)

CONTACTS

satellite@cerema.fr



EXPERTISE & INGÉNIERIE TERRITORIALE | BÂTIMENT
| MOBILITÉS | INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT |
ENVIRONNEMENT & RISQUES | MER & LITTORAL