RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Trame noire en Hauts-de-France

Mission d'assistance de la DREAL et du ministère de la transition écologique et solidaire en 2020

Étude de l'utilisation de données satellitaires comme indicateur de la pollution lumineuse

Rapport d'étude, janvier 2021



Crédit photo : Olivier PICHARD cc by sa 4

Avec la participation du

PRÉFET DE LA RÉGION HAUTS-DE-FRANCE
Liberté
Égalité
Fraternité

Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

Rapport d'étude du Cerema

Trame noire en Hauts-de-France

Mission d'assistance de la DREAL en 2020

Étude de la faisabilité de la cartographie de la trame noire à l'échelle départementale

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1	26/01/2021	

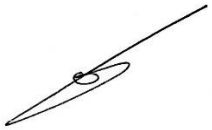
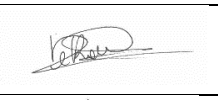
Affaire suivie par

Olivier PICHARD - Département Territoire Ecologie Energie Risques (TEER) – Groupe Risques, Eau, Biodiversité (REB)
Tél. :03 20 49 63 76
Courriel : Olivier.Pichard@cerema.fr
Site de Lille : Cerema Hauts-de-France – 44 ter rue Jean Bart, CS 20275 59019 Lille

Références

n° d'affaire : C20XXXXXX
Partenaire : Dreal Hauts-de-France (M. Frédéric Bince / Mme Bénédicte Lefevre)

Ce rapport inclut également des chapitres qui ont été financés par le ministère de la transition écologiques et solidaire, Direction de l'eau et de la biodiversité.

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Olivier PICHARD	26/01/2021	
Contrôlé par	Anne Claire DE ROUCK	Le 05/02/2021	
Validé par	Bruno KERLOC'H	Le 22/02/2021	

Visa de la directrice du département Territoires Écologie Énergie Risques

Date :

LAMPIN Signature numérique de LAMPIN Date : 2021.02.23 11:34:08 +01'00'

Corinne LAMPIN

Propriété intellectuelle

Conformément au code de la propriété intellectuelle, les livrables produits par le Cerema sont la propriété de leur auteur : droits moraux aux personnes physiques nommément désignées sur le rapport, droits patrimoniaux au Cerema. En conséquence, un exemplaire du rapport sera conservé à la documentation du Cerema pour une exploitation à des fins méthodologiques. Ces dispositions légales vous engagent à respecter l'obligation minimale de citation de l'auteur dans toutes vos communications impliquant notre production. De son côté, le Cerema s'engage à toujours citer le demandeur en tant qu'organisme ayant financé l'étude. Indépendamment de ces obligations minimales, des spécifications particulières visant à l'application du droit d'auteur (procédé et conditions de divulgation) peuvent être indiquées lors de la transmission du document final.

Certification qualité

Les prestations du Cerema Hauts-de-France sont menées dans le respect de sa politique Qualité.

Le Cerema Hauts-de-France est certifié ISO 9001 (version 2015) pour ses trois implantations (Lille, Sequedin et Saint-Quentin) depuis le 16 mars 2017.

Mots clés : Trame noire, biodiversité nocturne, trames verte et bleue, continuités écologiques.

Résumé de l'étude :

La prise en compte de la Trame noire dans tout projet d'aménagement est une nécessité réglementaire depuis les lois Grenelle I et II. Cela a été renforcé depuis la loi biodiversité de 2016. La publication de l'arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses a édicté des mesures concrètes de mise en œuvre de la lutte contre la pollution lumineuse. Les services de la DREAL ont sollicité le Cerema pour faciliter la mise en œuvre de cette politique publique et notamment pour :

- Réaliser un état des lieux des actions entreprises en Hauts-de-France pour lutter contre les nuisances lumineuses ;

- Établir une liste des espèces de chauves-souris les plus sensibles à la pollution lumineuse ;

- Rédiger des fiches pratiques pour alimenter la boîte à outils "Éviter Réduire Compenser" de la DREAL Hauts-de-France (cf 2 fiches annexées au présent document) ;

- Dégager les pistes d'actions à réaliser en 2020 pour mettre en œuvre la réduction des nuisances lumineuses en Hauts-de-France.

Table des matières

1 Contexte du présent rapport 7

2 Les données satellitaires du ciel nocturne 7

2.1 La donnée satellitaire est-elle pertinente pour caractériser la pollution lumineuse ?7

2.2 Qu'est-ce que la radiance ? 8

2.3 Limites de la mesure de la radiance nocturne par des satellites ? 9

2.4 La mesure de la radiance par un satellite reflète-t-elle la pollution lumineuse ?11

2.5 Quelles bandes spectrales utilisables pour caractériser la pollution lumineuse ?14

2.6 Meilleure résolution synonyme de meilleure pertinence ? 15

2.7 Quels satellites disponibles pour la trame noire ? 16

2.8 L'outil VIIRS/NPP du satellite Suomi NPP 19

2.8.1 Exploitation des données VIIRS/NPP grâce à l'application Web Radiance Light Trends 19

2.9 Jilin 1 23

2.10 Satellite Luojia 27

3 Synthèse 31

4 Contacts 32

5 Bibliographie 33

1 Contexte du présent rapport

Les services de la DREAL Hauts-de-France ont sollicité le Cerema en 2019 car la prise en compte de la Trame noire dans tout projet d'aménagement est une nécessité réglementaire depuis les lois Grenelle I et II. Cela a été renforcé depuis la loi biodiversité de 2016. La publication de l'arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses a édicté des mesures concrètes de mise en œuvre de la lutte contre la pollution lumineuse.

Le rapport remis à la DREAL en mars 2020 avait pour objectif de faciliter la mise en œuvre de cette politique publique et notamment pour :

- Réaliser un état des lieux des actions entreprises en Hauts de France pour lutter contre les nuisances lumineuses ;

- Établir une liste des espèces de chauves-souris les plus sensibles à la pollution lumineuse ;

- Rédiger des fiches pratiques pour alimenter la boîte à outils "Éviter Réduire Compenser" de la DREAL Hauts-de-France (cf 2 fiches annexées au présent document) ;

- Dégager les pistes d'actions à réaliser en 2020 pour mettre en œuvre la réduction des nuisances lumineuses en Hauts-de-France.

Ce rapport reprenant les éléments ci-dessus est disponible à l'adresse suivantes :

https://www.cerema.fr/fr/actualites/agir-contre-pollution-lumineuse-favoriser-trame-noire-hauts

À la suite de ce premier travail, la DREAL Hauts de France a souhaité savoir s'il était possible de cartographier la trame noire grâce à des données satellitaires. Le présent rapport dresse un état des lieux des outils disponibles à cette fin.

2 Les données satellitaires du ciel nocturne

2.1 La donnée satellitaire est-elle pertinente pour caractériser la pollution lumineuse ?

Il existe plusieurs possibilités pour dresser des cartes de pollution lumineuse. Pour cela, il est possible d'utiliser plusieurs sources de données permettant d'effectuer des simulations de pollution lumineuse. Les principales sources de données utilisables sont les suivantes (Deverchère, Vauclair, Nguyen Duy - Bardakji 2018) :

- images satellites basse résolution mesurant la radiance ;
- bases de données géolocalisées des agglomérations avec connaissance des zones urbanisées ;
- statistiques détaillées sur la nature des sols (tissu urbain, sol artificialisé, prairies, espaces boisés, etc.) ;
- sources lumineuses discrètes géolocalisées.

Ces sources de données présentent des avantages et inconvénients qu'il est possible d'évaluer selon 3 axes souvent utilisés dans l'étude de la pollution lumineuse (Deverchère, Vauclair, Nguyen Duy - Bardakji 2018) :

- axe **spatial** (résolution des cartes et respect de l'implantation des réseaux d'éclairage) ;
- axe **temporel** (variabilité nocturne, extinctions, évolution des réseaux sur le moyen et long terme) ;
- axe **spectral** (spectre des flux lumineux induisant la pollution lumineuse).

Les avantages et inconvénients sont synthétisés ci-dessous :

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

Figure 1 : Tableau de synthèse des avantages et inconvénients de différentes données sources dans la caractérisation de la pollution lumineuse, selon trois axes. Source (Deverchère, Vauclair, Nguyen Duy - Bardakji 2018)

Tel qu'indiqué en contexte du présent rapport, nous nous intéresserons ici à l'évaluation de la pollution lumineuse à grande échelle, celle d'un parc naturel régional, d'un département voire d'une région par exemple. La source de données adaptée à une telle échelle est la radiance satellitaire.

2.2 Qu'est-ce que la radiance ?

La radiance, également appelée luminance énergétique (notée Le), est la puissance par unité de surface du rayonnement passant ou étant émis en un point d'une surface, et dans une direction donnée par unité d'angle solide. La radiance indique la manière dont sera vue la lumière émise par une surface donnée (en réflexion, transmission ou diffusion) par un système optique visant cette surface sous n'importe quel angle de vue. L'unité de la radiance est le $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ (watts par stéradian et par mètre carré).

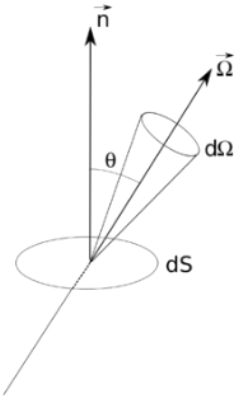


Figure 2 : On trouve parfois la luminance écrite sous forme de vecteur aligné suivant la direction d'émission Ω . Cette quantité est en fait Ω Le. Source wikipedia

2.3 Limites de la mesure de la radiance nocturne par des satellites ?

De nuit, la radiance est globalement moindre que de jour. Mais la plage dynamique[1] du paysage nocturne est très étendue. En effet pour les zones pas éclairées, le rayonnement lumineux sera très faible, 8 fois moindre que de jour mais pour des rues éclairées, il sera environ 4 fois moindre que l'éclairage direct du soleil (Hänel et al. 2018). La distribution de la radiance la nuit est donc différente de celle de jour, influencée par les zones sombres.

Certains éclairages peuvent éclairer en grande partie directement vers le ciel sans réflexion de la lumière au sol et avoir une radiance proche du soleil. Les capteurs de nuit destinés à mesurer la radiance de tout type d'éclairage au sol doivent donc disposer d'une plage dynamique de mesure très grande. Cela est toujours insuffisant et aux fortes résolutions, les zones non éclairées sont généralement sous exposées (Levin et al. 2020). Paradoxalement, les satellites à faible résolution ont beaucoup

[1] rapport de la plus grande à la plus petite valeur d'une grandeur. Cette grandeur peut caractériser l'intensité d'un son ou d'une lumière

moins de difficulté à gérer ce problème de plage dynamique étendue (Levin et al. 2020).

L'un des autres inconvénients des données de radiance satellite est qu'elles reflètent l'état de la luminance énergétique à une heure définie de la nuit, au moment où le satellite prend le cliché, souvent en deuxième partie de nuit là où certaines communes pratiquent l'extinction nocturne. De ce fait, certaines pollutions lumineuses de début de nuit n'apparaissent pas. Il est important de prendre connaissance des horaires de prises de vue des satellites pour identifier les biais possibles qu'ils induisent.

La plupart du temps, les conditions de prise de vue des images satellites pour constituer les cartes de radiance, notamment les heures de passage, peuvent varier pour les images individuelles utilisées dans la constitution des jeux de données composites (Deverchère, Vauclair 2019; Zhao et al. 2019).

De plus, les algorithmes utilisés pour constituer les cartes de radiance suppriment parfois des sources lumineuses transitoires mais peuvent aussi en conserver à tort, comme l'ont montré des cartes des Pyrénées où les dameuses de pistes de ski étaient visibles (Deverchère, Vauclair 2019). Il peut donc être utile parfois de vérifier ces données de radiance satellite avec d'autres sources de données.

Les quatre principaux défaut liés à la mesure par la radiance sont les suivants (Association française de l'éclairage 2018) :

- l'imagerie satellite ne capture pas la diffusion latérale de la lumière à 100 km ;
- la plupart des détecteurs, de par leur sensibilité, coupent à 500 nanomètres et sont donc incapables de mesurer efficacement le spectre dans le bleu ;
- tel qu'indiqué précédemment, certains satellites passent au-dessus de la France après 1h00 du matin. Il n'est donc pas possible dans ce cas d'obtenir les mesures en début de nuit avant les variations de puissance ;
- les mesures ne sont valables que par beau temps, les nuages étant capables de multiplier par 10 ou par 20 la pollution lumineuse globale.

2.4 La mesure de la radiance par un satellite reflète-t-elle la pollution lumineuse ?

La pollution lumineuse, que l'on peut définir comme une nuisance d'origine anthropique par des éclairages artificiels, se caractérise essentiellement par la détermination de la brillance du fond de ciel nocturne appelée également NSB (Night Sky Brightness) (Deverchère, Vauclair 2019). Elle est traditionnellement exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré ($W.m^{-2}.sr^{-1}$, écrit aussi mag/arcsec²). Cette unité est celle d'une luminance (Deverchère, Vauclair, Bonavitacola 2018).

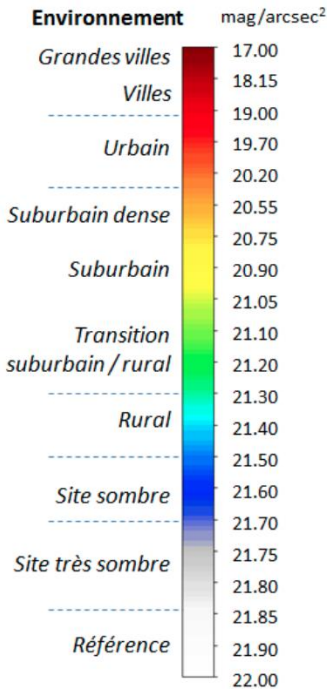


Figure 3 : Échelle des valeurs de brillance de fond de ciel en mag/arcsec². Les valeurs les plus élevées correspondent aux brillances les plus faibles. Source (Deverchère, Vauclair, Bonavitacola 2018).

Il existe plusieurs façons de mesurer la NSB (Hänel et al. 2018) mais la principale est la mesure de la NSB zénithale. La mesure de cette dernière s'effectue au sol grâce à des Sky Quality Meter (SQM) ou dans une version améliorée développée par la société DarkSkyLab, grâce au Ninox (Deverchère, Vauclair, Bonavitacola 2018).

Aux abords des zones habitées, la NSB est composée à la fois de sources lumineuses naturelles (lune, étoiles) et artificielles (Hänel et al. 2018). Même après le coucher du soleil, celui-ci peut encore émettre de la lumière diffuse, au moment du crépuscule ou par des nuages noctulescents par exemple (Hänel et al. 2018).

La NSB est fortement influencée par les conditions météorologiques. Une carte de pollution lumineuse doit donc préciser s'il s'agit d'une carte représentative d'un ciel

clair avec peu de charge aérosol, peu d'humidité, avec ou sans lune, ou au contraire avec présence d'un voile nuageux avec un ciel couvert, etc. Les résultats seront notoirement différents (Deverchère, Vauclair 2019).

Il a même été montré que selon l'outil de mesure utilisé pour caractériser la pollution lumineuse, il était possible d'avoir des résultats contradictoires. En effet dans une expérience sur l'incidence du remplacement de lampes à sodium haute pression par des LED (Bara, Rigueiro, Lima 2019), une diminution de la radiance par le satellite VIIRS-DNB a été observée alors que le ciel paraissait plus clair pour un observateur à vision scotopique[2] situé à une distance proche de la source et plus sombre pour un observateur à vision photopique[3] situé à grande distance de la source. Et pour compliquer le tout, le SQM utilisé dans l'expérience ne montrait pas de relation nette avec les observations effectuées à l'œil nu…

Pour ce qui est de la diminution de la radiance perçue par le satellite VIIRS-DNB, cela s'explique par le pic d'émission des LED dans le bleu aux alentours de 460 nm alors que la plage de détection de la radiance du satellite VIIRS-DNB est de 500-900 nm. Les lampes à sodium hautes pression émettant aux alentours de 814 nm, la radiance est donc mieux captée par le satellite que celle des LED.

Tout ceci démontre la complexité de la caractérisation de la pollution lumineuse. Il est donc nécessaire de bien définir quel type de pollution lumineuse est à mesurer et d'évaluer en conséquence les outils et leurs caractéristiques techniques à utiliser.

Si la radiance satellite peut tout de même constituer un indicateur de la pollution lumineuse, il est très utile, voire nécessaire, de la compléter par les données de luminance des sources lumineuses perçues au niveau du sol pour la caractériser correctement (Deverchère, Vauclair 2019; Zhao et al. 2019).

La société DarkSkyLab a développé un logiciel nommé OTUS, qui permet de transformer les données de radiance en valeur de NSB 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) (Deverchère, Vauclair 2019). OTUS permet également si besoin d'ajouter ou de retirer des sources lumineuses pour compléter les données de radiance satellite. La figure *4* ci-dessous permet de voir la différence entre une carte illustrant la radiance satellite et une carte de simulation de la pollution lumineuse.

[2] se dit de la vision avec faible luminosité, vision nocturne essentiellement avec les bâtonnets de l'œil.
[3] la vision photopique correspond à la vision à forte luminosité, donc à la vision de jour (diurne) où les cônes sont sollicités. La vision photopique a une faible sensibilité mais une forte résolution et propose une bonne perception des rouges.

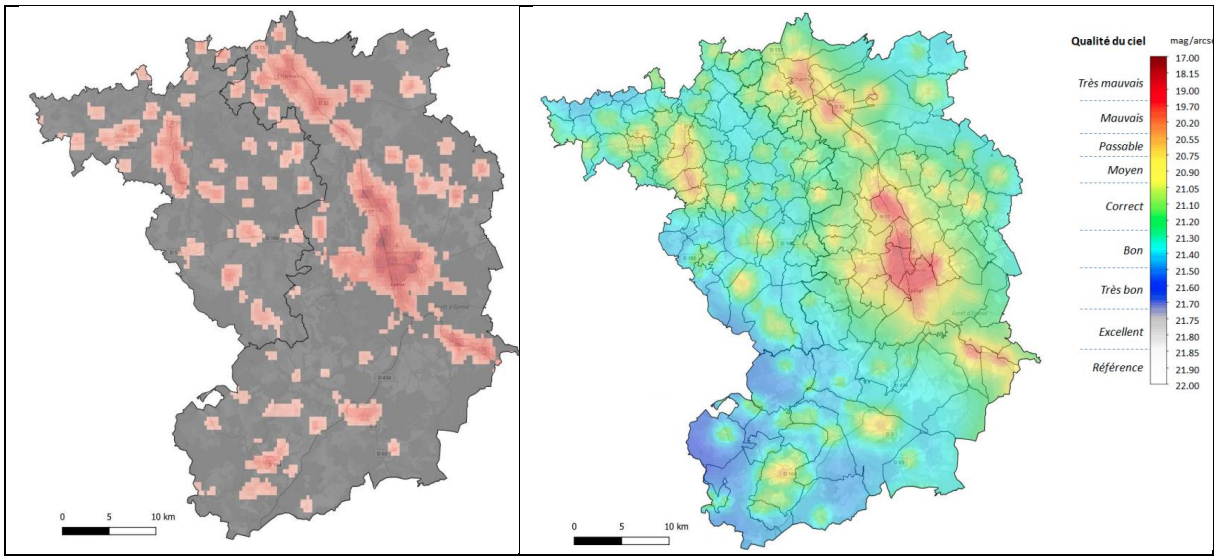


Figure 4 : A gauche carte de la radiance satellite (données NOAA VIIRS-DNB composite 2015) sur le territoire du SCOT des Vosges centrales. À droite, carte de simulation de la pollution lumineuse grâce au logiciel OTUS, à partir des données de radiance sur le même territoire (Deverchère, Vauclair 2019).

2.5 Quelles bandes spectrales utilisables pour caractériser la pollution lumineuse ?

Les satellites embarquent plusieurs types de dispositifs permettant de capturer des images soit grâce à des capteurs numériques soit à des scanners (push-broom scanner).

Le tableau ci-dessous résume les principales bandes spectrales pouvant équiper les satellites avec leurs champs d'application. Les bornes des longueurs d'onde sont données à titre indicative car elles varient selon le type de capteur embarqué.

bande spectrale	gamme de longueur d'onde	résolution au sol	caractéristiques spectrales
BO	450nm ~ 800nm	5 m	Spectre panchromatique
B1	403nm ~ 423nm	5 m	Spectre sensible aux matières jaunes
B2	433nm ~ 453nm	5 m	Seaclanseoast
B3	450nm ~ 515nm	5 m	Bleu
B4	525nm ~ 600nm	5 m	Vert
BS	630nm ~ 680nm	5 m	Rouge
B6	784.5nm ~ 899.5nm	5 m	Index de surface foliaire
B7	485nm ~ 495nm	10 m	Chlorophylle et autres pigments
B8	615nm ~ 625nm	10 m	Dépôts de sédiments
B9	650nm ~ 680nm	10 m	Sommet du pic d'absorption de la chlorophylle
B10	698.75nm ~ 718.75nm	10 m	Référence spectrale de la fluorescence de la chlorophylle
B11	732.5nm ~ 747.Snm	10 m	Spectre red-edge
B12	773nm ~ 793nm	10 m	Index de surface foliaire
B13	855nm ~ 875nm	20 m	Sensibilité à la chlorophylle, à la biomasse et à l'index de surface foliaire
B14	660nm ~ 670nm	20 m	Chlorophylle, transport de sédiments, sédiments
B15	677.5nm ~ 685nm	20 m	Somme du pic d'absorption de la fluroescence de la chlorophylle
B16	750nm ~ 757.5nm	20 m	Spectre de référence d'absorption de l'O2
B17	758.75nm ~ 762.5nm	20 m	Spectre d'absorption de l'O2
B18	935nm ~ 955nm	20 m	Correction de la vapeur
B19	1000nm ~ 1040nm	20 m	Correction de l'atmosphère et des aérosols
SW1	1195nm ~ 1225nm	100 m	Distinction des masses d'eau et état de santé de la canopée
SW2	1360nm ~ 1390nm	100 m	Détection des nuages de glace de haute altitude et des nuages convolutionnels
SW3	1550nm ~ 1590nm	100 m	Contenu en eau des plantes et des cultures, pénétration de la fumée, humidité du sol, distinction entre les nuages et la neige, surveillance de la sécheresse
SW4	1610nm ~ 1690nm	100 m	Pénétration de la fumée, identification des incendies, distinction entre les nuages et la neige
MW1	3700nm ~ 4950nm	100 m	Identification des incendies
LW1	7500nm ~ 13500nm	150 m	Surveillance de+A1:D26 la température de surface et prévention dans la lutte contre les incendies

Figure 5 : Principales bandes spectrales pouvant équiper les satellites avec leurs champs d'application. Source : CG Satellite society (CG Satellite society [sans date])

Les spectres les plus utilisables pour la pollution lumineuse sont ceux du bleu, du vert, du rouge et du proche infrarouge (O. Thiery, comm. pers.), (Zheng et al. 2018).

2.6 Meilleure résolution synonyme de meilleure pertinence ?

Si des satellites offrent désormais une bonne résolution comme Eros B ou Jilin-1, plusieurs publications ont montré que cela n'était pas forcément l'idéal selon l'objectif poursuivi (Levin et al. 2020). En effet, pour la caractérisation de la pollution lumineuse, les meilleurs résultats sont obtenus pour des résolutions de 50 à 100 m (Katz, Levin 2016) et même à des résolutions moindres (Anderson et al. 2010). L'augmentation de la résolution entraîne davantage d'artefacts par l'effet combiné de la moindre sensibilité aux zones faiblement éclairées et du contraste plus grand entre les zones sombres et lumineuses (Katz, Levin 2016). Toutefois Wang (Wang et al. 2020) a indiqué dans son étude que JL1-3B était moins sensible que Luojia 1-01 à la saturation et l'effet de bavure des fortes lumières.

À haute résolution, il y a de plus grandes différences entre la luminosité horizontale mesurée au sol et la radiance mesurée par le satellite car ce dernier ne mesure que la lumière artificielle émise verticalement (Katz, Levin 2016).

Ainsi, le satellite Luojia-1 avec une résolution de 100 à 130 m offre donc une solution a priori assez bien adaptée pour caractériser la pollution lumineuse, d'autant que cette solution est quasiment gratuite !

2.7 Quels satellites disponibles pour la trame noire ?

Il existe plus d'une douzaine de capteurs installés sur des satellites depuis le début des années 1990 permettant de caractériser la pollution lumineuse. Le premier à avoir fourni des images à grande échelle et permis de prendre la mesure de la pollution lumineuse est le capteur DMSP/OLS. Ce dernier a produit des images toutes les nuits entre 1992 et 2013. Le tableau ci-dessous résume tous les capteurs permettant d'obtenir des clichés de la pollution lumineuse avec leurs principales caractéristiques.

Type de capteur	**Résolution spatiale (m)**	**Années disponibles**	**Fréquence de mise à jour**	**Données produites**	**Bandes spectrales**
DMSP/OLS	3000	Archives numériques disponibles entre 1992 et 2013	Une couverture globale est disponible toutes les 24 heures	Lumières fixes, Radiance calibrée, moyenne des valeurs	Panchromatique 400–1100 nm (8 bits)
VIIRS/DNB VIIRS/NPP (=VNP46A1) depuis 2019	740 (500m depuis 2019 pour Nasa Black Marble = VNP46A1)	Lancé en Oct. 2011	Images disponibles quotidiennement en téléchargement	Images sans couche nuageuse disponibles mensuellement depuis avril 2012 en unité nano-watts/cm2*sr). Données rectifiées quotidiennement. Le VNP46A1 est disponible depuis mi 2019 (NASA Black Marble).	Panchromatique 505–890 nm (14 bits)
Aerocube 4	500	Cubesat (nano-satellite) expérimental, 2014	Episodiquement	N\A	RGB
SAC-C HSTC	300	Lancé en nov. 2000	Episodiquement	N\A	Panchromatique 450–850 nm
SAC-D HSC	200–300	Lancé en juin 2011	Episodiquement	N\A	Panchromatique 450–900 nm
Photographies des astronautes à bord de la station spatiale internationale (ISS)	5–200	Depuis 2003 (depuis mission ISS006)	Episodiquement	Images disponibles à cette adresse http://eol.jsc.nasa.gov/	RGB
CUMULOS	150	Cubesat (nano-satellite) expérimental, 2018	Episodiquement	N\A	Panchromatique
LuoJia1-01	130	Lancé en juin 2018	Tous les 15 jours	Disponible gratuitement sur le site de l'université de Wuhan	Panchromatique, 460–980 nm et bleu (430-512) - 14 bits
Aerocube 5	124	Cubesat (nano-satellite) expérimental, 2015	Episodiquement	N\A	RGB
Landsat 8	15–30	Lancé en 2013	Images de nuit acquises épisodiquement	Disponible gratuitement	7 bandes
Jilin-1 (JL1-3B)	0.9	Lancé en janvier 2017	Satellite commercial avec acquisition sur demande	N\A	430–512 nm (bleu)), 489–585 nm (vert) and 580–720 nm (rouge) – 8 bits

JL1-07/08	<1	Lancé en janvier 2018	Satellite commercial avec acquisition sur demande	N\A	Panchromatique et multi-spectre (bleu, vert, rouge, red-edge et proche infrarouge)
EROS-B	0.7	Images de nuit disponibles depuis mi 2013	Satellite commercial avec acquisition sur demande	N\A	Panchromatique

Figure 6 : Principaux capteurs spatiaux disponibles pour obtenir des images permettant de rendre compte de la pollution lumineuse, classés par résolution croissante. Adapté du travail de Levin et coll. (Levin et al. 2020) et de Wang et coll. (Wang et al. 2020)

Le graphique ci-dessous permet de visualiser leur capacité en termes de résolution en fonction de leur année de mise en service.

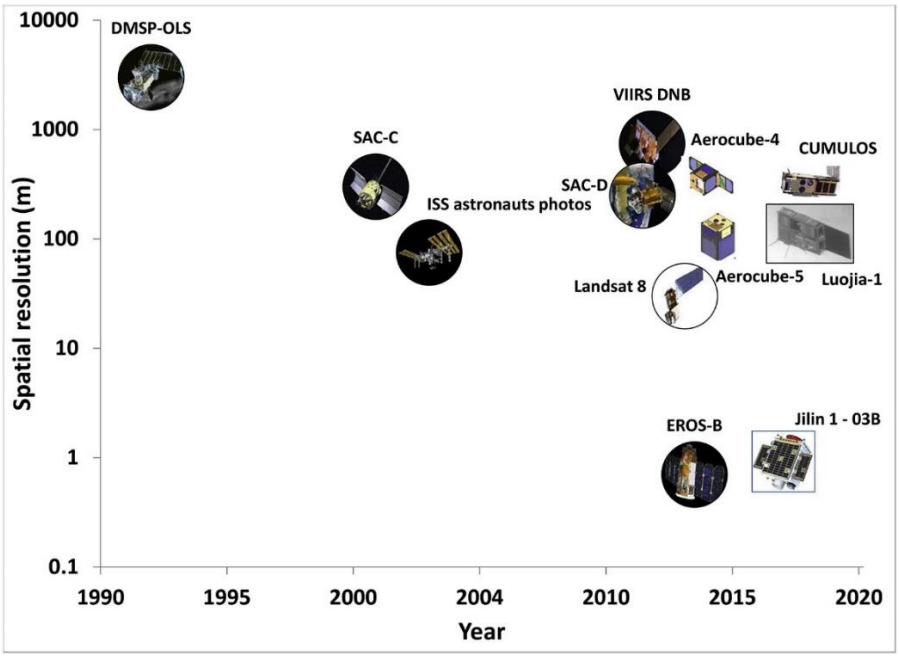


Figure 7 : Capteurs spatiaux disponibles pour caractériser la pollution lumineuse, selon leur résolution et l'année de leur mise en service (Levin et al. 2020).

Nous pouvons également mentionner pour mémoire le satellite VENUS qui a pu acquérir sur certaines zones du territoire national de manière démonstrative des photos de nuit (J.M Delvit, CNES, comm. pers.), mais pas sur le territoire des Hauts-de-France.

Les données de VENUS sont correctes car au moment de l'acquisition des images, il est possible de ralentir le satellite ce qui minimise la désynchronisation. Ces données ont une résolution de 10 mètres environ. Les données sont accessibles via l'agence spatiale française, le CNES. Malheureusement pour la suite de la mission VENUS (passage à une orbite à 1 jour), les acquisitions de nuit ne sont pas prévues (J.M Delvit, CNES, comm. pers.).

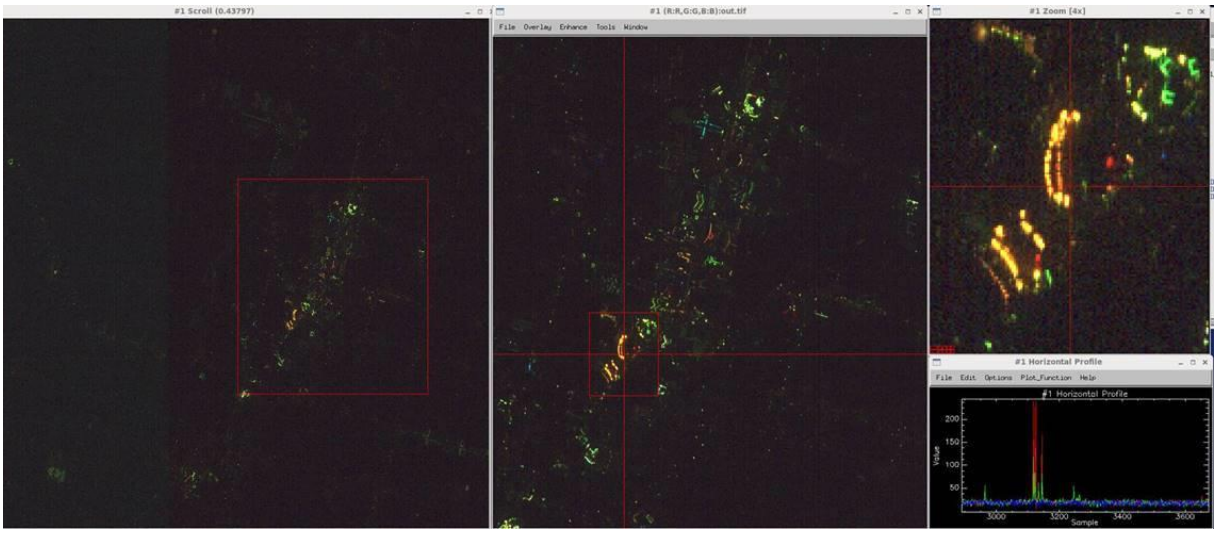


Figure 8 : Exemple de cliché nocturne pris par la mission VENUS (J.M. Delvit, CNES, comm. pers.)

Au vu de l'analyse des capteurs disponibles pour caractériser la pollution lumineuse, trois d'entre eux ont retenu notre attention en raison :

- de leur disponibilité pour les Hauts-de-France ;
- de leur coût « abordable » ;
- de leur pertinence pour caractériser la pollution lumineuse à une grande échelle.

Les capteurs retenus pour ce présent rapport sont donc VIIRS/NPP, Luojia-1 et Jilin 1.

Il est toutefois à prendre en considération le satellite israélien EROS-B qui a été le premier satellite commercial à offrir une haute résolution (0,7 m) pour des images de nuit. Ce satellite a été lancé en 2006 mais n'a débuté des acquisitions de nuit qu'en 2013. Les données de EROS B sont plus chères que celles de JiLiN 1 (100 euros environ du km^2) et les images seraient de moins bonnes qualité dans le cadre d'une utilisation pour la pollution lumineuse.

Il est également important de mentionner CO3D (acronyme de Constellation Optique en 3D) qui est une constellation de mini-satellites d'observation de la Terre développée par le CNES. Composée de 4 satellites d'environ 300 kilogrammes, la constellation de satellites CO3D doit fournir des images tri-dimensionnelles de la surface de la Terre avec une précision de 1 mètre en altitude et une résolution spatiale de 50 centimètres. La constellation CO3D remplit à la fois des objectifs civil et militaire. CO3D pourrait donc être bien utile pour caractériser la pollution lumineuse. Il n'est toutefois pas encore opérationnel. L'échéance est prévue pour 2024 et les acteurs institutionnels auront un accès privilégié à coût réduit (J.M. Delvit, CNES, comm. pers.).

2.8 L’outil VIIRS/NPP du satellite Suomi NPP

La « suite de radiomètres pour imageurs dans l'infrarouge et le visible » (en anglais : Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS) est un système de capteur conçu et fabriqué par la société Raytheon. Elle est embarquée à bord des satellites météorologiques Suomi NPP et NOAA-201. VIIRS est l'un des cinq instruments clés emportés à bord du satellite Suomi NPP, lancé le 28 octobre 2011. VIIRS est un radiomètre (instrument qui permet de mesurer l'intensité du flux de rayonnement électromagnétique, dans différents domaines de longueurs d'onde) à balayage. Il collecte des images et des mesures radiométriques de la terre, de l'atmosphère, de la cryosphère et de l'océan mondial dans toutes les bandes du visible et de l'infrarouge du spectre électromagnétique. C'est l'un des outils les plus utilisés pour cartographier à grande échelle la pollution lumineuse.

L’inconvénient est que le capteur multispectral dont la gamme s’étend de 505 à 890 nm manque une partie du spectre d’émission des ampoules de type LED, qui émettent généralement entre 400 et 700 nm, avec un pic dans le bleu et le vert. C’est le pic dans le bleu, aux alentours de 440 nm qui n’est dans ce cas pas visible par ce capteur multispectral (Gaston et al. 2014; Zhao et al. 2019).

2.8.1 Exploitation des données VIIRS/NPP grâce à l’application Web Radiance Light Trends

Web Radiance Light Trends (https://lighttrends.lightpollutionmap.info/), est une application web conçue pour mesurer les tendances en termes de luminosité ambiante nocturne radiante vers l'espace. Depuis 2019, à partir d'une base de données mise à jour en permanence, l'outil permet de sélectionner des secteurs (jusqu’à 5 000 km² et au minimum de 0,14km²) n'importe où sur la planète, et de très rapidement générer un graphique de variation temporelle de la luminosité nocturne, et ce pour n’importe quelle période depuis 1992.

Le capteur de radiance n'a pas la précision de celui permettant une photo aérienne à basse ou moyenne altitude, mais l'outil couvre la planète sur 25 ans. De plus, depuis 2012, le capteur d'un des satellites utilisés permet de faire la distinction entre par exemple une source telle que des serres éclairées ou un groupe d'une douzaine de lampadaires.

Quiconque peut « dessiner » sur la carte la zone qui l'intéresse, fixer un intervalle chronologique de temps (mensuel, annuel) puis exporter ces données (en différents formats). Il est ainsi possible de montrer bien plus rapidement le lien entre périurbanisation, industrialisation, routes et pollution lumineuse.

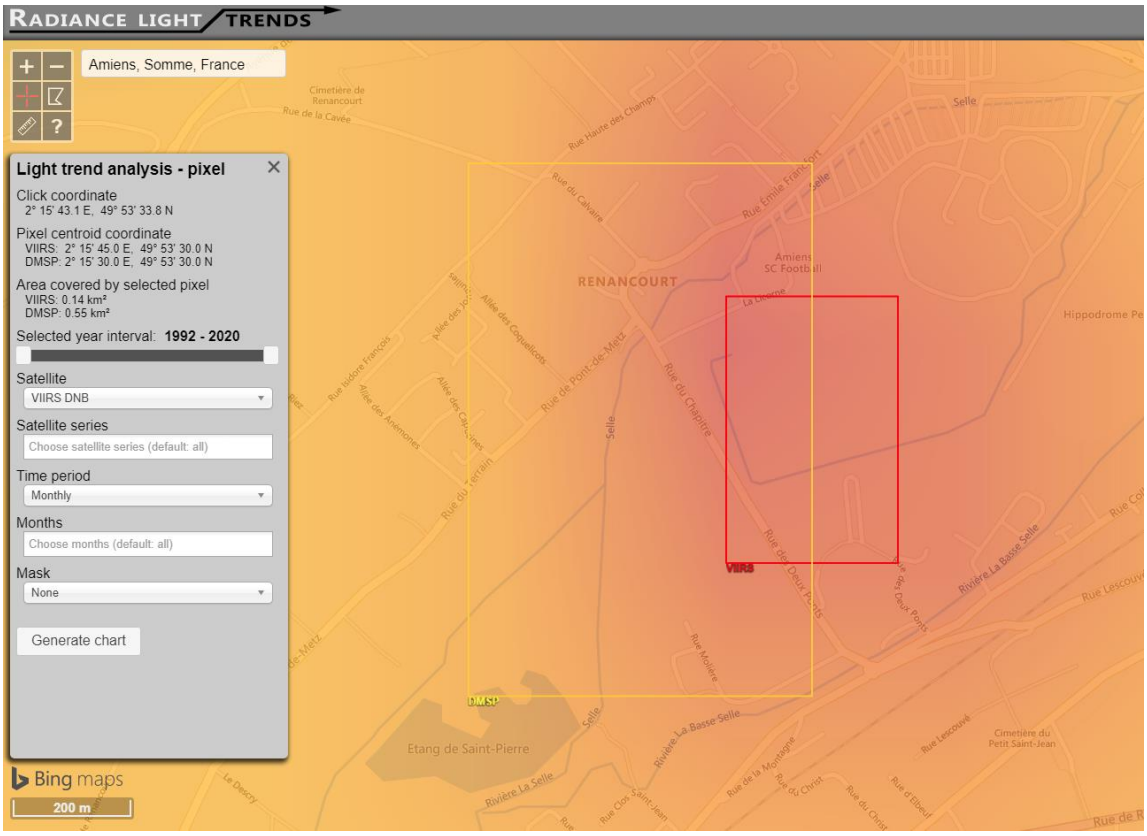


Figure 9 : Sélection de la valeur de pixel la plus petite disponible pour le satellite DMSP (jaune) et le VIIRS (en rouge). En combinant les différents satellites, il est possible d'obtenir des évolutions de la radiance depuis 1992. Source https://lighttrends.lightpollutionmap.info/

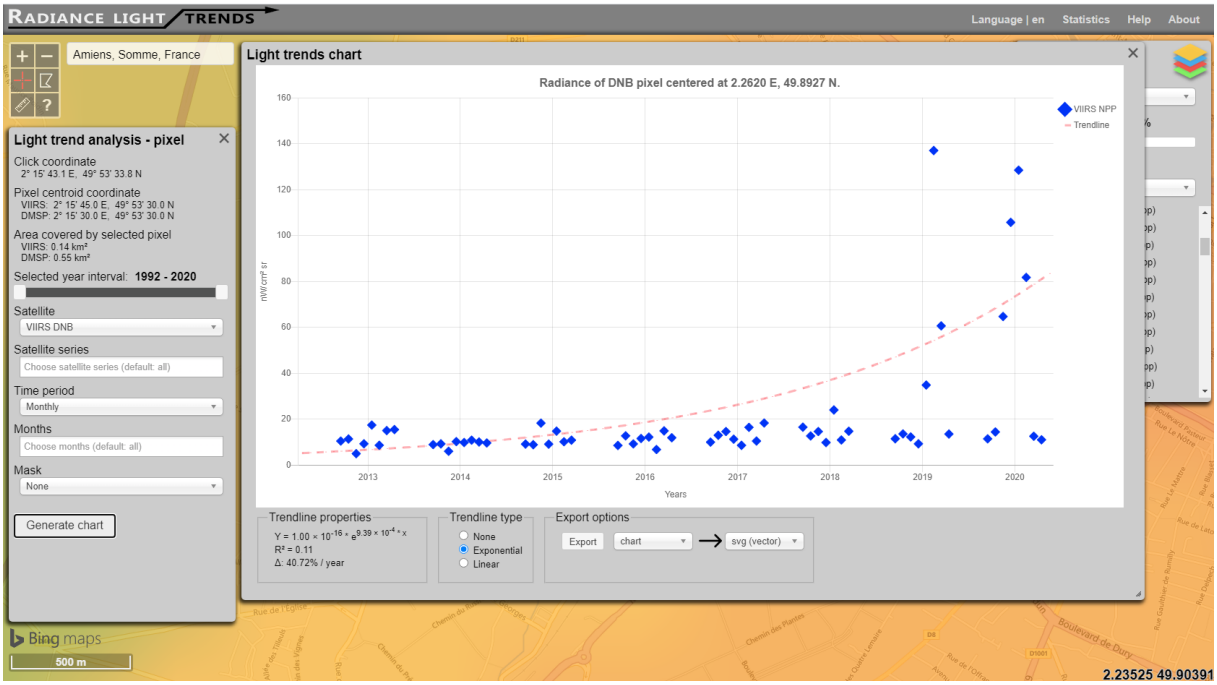


Figure 10 : En sélectionnant les valeurs pour le satellite VIIRS/DNB (rectangle rouge de la Figure 9), il est possible de visualiser l'évolution de la radiance sur la plage de temps disponible pour le satellite en question, ici depuis 2013. Source https://lighttrends.lightpollutionmap.info/.

La Figure 10 ci-dessus montre une augmentation a priori significative de la radiance au niveau du stade de la Licorne d'Amiens depuis 2013. Ce type de résultat doit toutefois toujours être pris avec précaution et nécessite des investigations de terrain pour déterminer s'il y a eu des modifications importantes du système d'éclairage permettant de corroborer cette tendance.

Ce type de graphique peut bien entendu être réalisé sur un périmètre plus large également. Mais les évolutions sur une plus grande surface peuvent être délicates à interpréter en raison de l'augmentation des différences de la composition de l'éclairage artificiel.

L'application Web Radiance Light Trends permet d'un coup d'œil de se rendre compte de l'état de la pollution lumineuse sur un grand territoire comme le montre la Figure 11 ci-dessous.

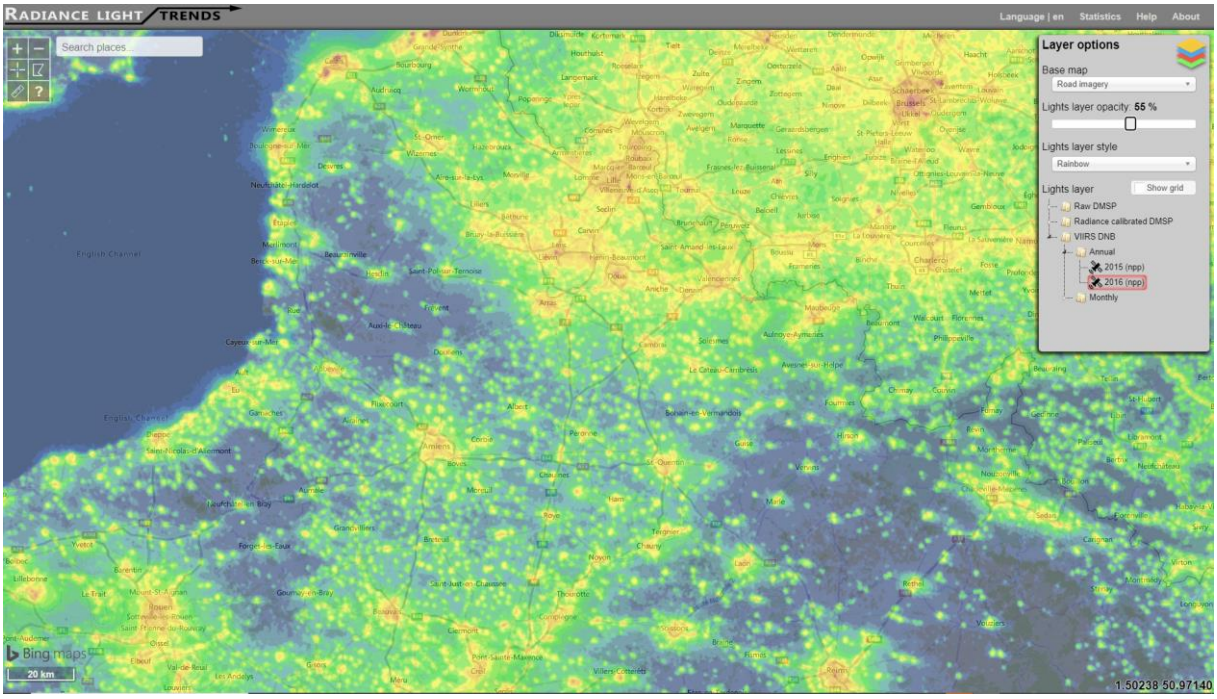


Figure 11 : Exemple de cartographie de la pollution lumineuse sur les Hauts-de-France grâce à l'application Web Radiance Light Trends. Source https://lighttrends.lightpollutionmap.info/.

En zoomant sur un territoire comme celui de l'agglomération d'Amiens, l'application Web Radiance Light Trends permet de faire des comparaisons visuelles des variations de pollution lumineuse sur plusieurs années.

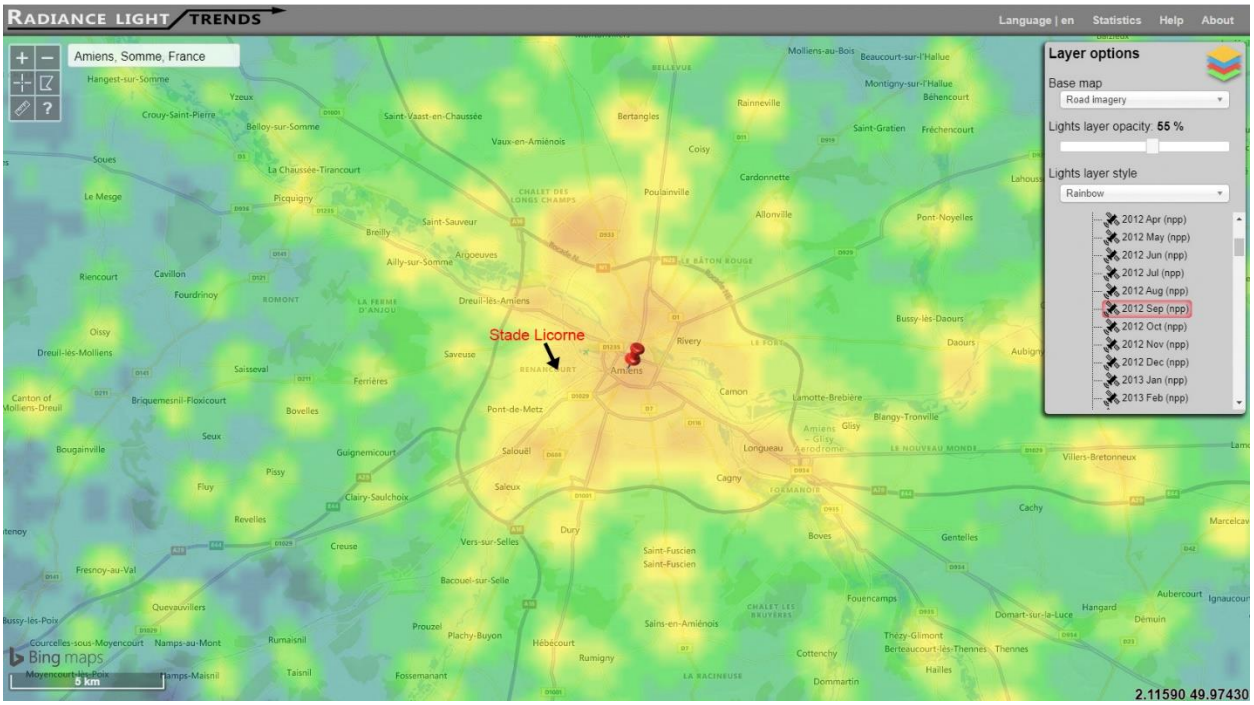


Figure 12 : Exemple de cartographie de la pollution lumineuse sur l'agglomération d'Amiens grâce à l'application Web Radiance Light Trends (https://lighttrends.lightpollutionmap.info/). Données NPP de septembre 2012.

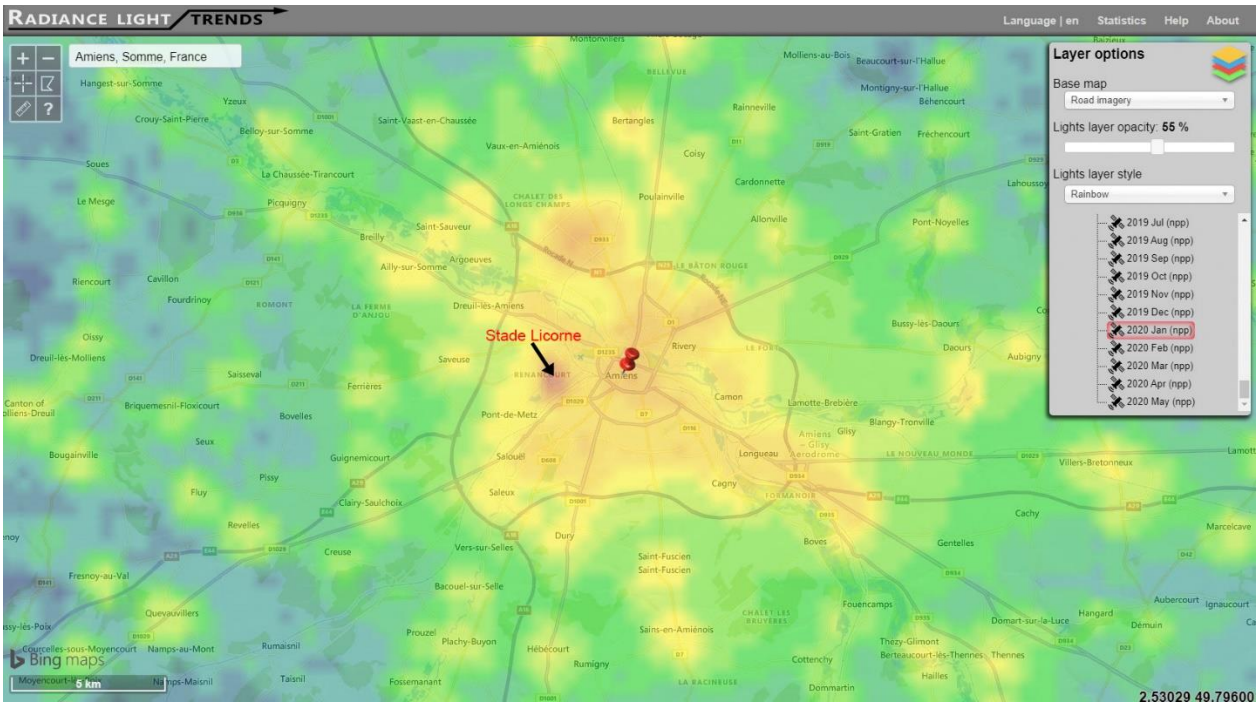


Figure 13 : Exemple de cartographie de la pollution lumineuse sur l'agglomération d'Amiens grâce à l'application Web Radiance Light Trends (https://lighttrends.lightpollutionmap.info/). Données NPP de janvier 2020

L'examen des cartographies sur des mois différents (figure 12 et figure 13) permet de rendre perceptibles des variations de luminosité. Nous remarquons par exemple que la lumière émise par le stade de la Licorne est plus importante sur le cliché de 2020 que sur celui de 2012, ou que l'intensité lumineuse de la commune de

Bougainville est plus importante sur le cliché de 2020 que sur celui de 2012 également. Il ne faut toutefois pas tirer de conclusion hâtive consistant à dire que la situation s'est « dégradée » au fil du temps. En effet, il faut tenir compte des extinctions nocturnes pratiquées par les communes et de la concordance ou non du passage du satellite au moment de celles-ci, mais également des conditions météorologiques du moment. Pour le stade de la Licorne, il est possible qu'un événement sportif particulier à l'instant du passage du satellite ait permis de révéler la forte intensité lumineuse de ses 96 projecteurs de 2 000 W chacun.

Des comparaisons entre les différents mois sont donc possibles mais il faut être attentif pour comparer les variations de couleur de façon globale afin de faire ressortir des variations relatives et non absolues. En effet, des variations de conditions atmosphériques peuvent entraîner des fluctuations de la radiance.

2.9 Jilin-1

Jilin-1 est le nom de la constellation qui comprend actuellement 16 satellites.

Il s'agit de satellites commerciaux gérés par la société chinoise Chang Guang Satellite Technology[4] (CG Satellite).

Le premier satellite, commercialisé par CG satellite se nommait Jilin-1 Optical A et a été mis en service le 7 octobre 2015. Il disposait d'une résolution spatiale de 0,72 m en panchromatique et 2,88 m en multispectral. Il y a eu également les satellites Video 01&02 lancés le même jour. Le satellite 02 permettait d'avoir des images de nuit à une résolution de 1,13 m mais avec une image RVB non multispectre.

Le satellite Jilin-1-3B (= JL1-3B = Jilin-1 SP-03 = Jilin-1 Video 3) a été lancé le 9 janvier 2017 et produit une image multi-spectre avec les 3 bandes suivantes utiles pour l'imagerie nocturne :

- bleu : 437 nm – 512 nm ;
- vert : 489 nm – 585 nm ;
- rouge : 580 nm – 723 n

Sa taille de vue standard est de 11 x 4,6 km.

JL1-3B est capable de détecter des niveaux de radiance assez faibles, de l'ordre de 7 $E^{-7}.W.cm^{-2}.sr^{-1}$ (Zheng et al. 2018).

Certains de ces satellites Jilin ont des caractéristiques différentes les uns des autres. Les images de nuit sont réalisées par plusieurs satellites notamment le 02A, 03-B, 03, 07, 08.

[4] https://www.cgsatellite.com/imagery/luminous-imagery/

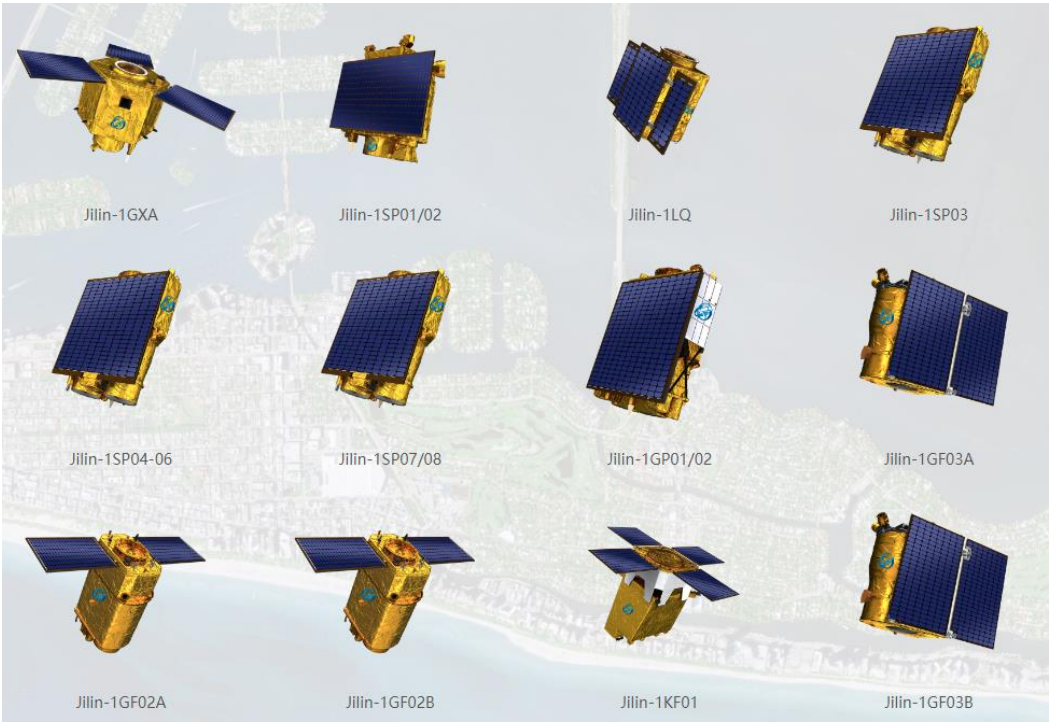


Figure 14 : Illustration des différents satellites commercialisés par la société Chang Guang satellite technology (source http://www.charmingglobe.com/).

Il convient de se reporter au site du constructeur, https://www.cgsatellite.com/ pour connaître les caractéristiques de chaque satellite.

JL1-3B a une résolution de 0,92 m en RGB et dispose d'un outil de calibrage embarqué de la radiance.

L'intérêt de la bande multi spectrale telle que celle de JL1-3B est de permettre de distinguer les types d'éclairage (lampe sodium haute pression, lampe à fluorescence, Led…) par leurs différences d'émissions spectrales. Une expérience a été menée dans la ville chinoise de Hangzhou pour distinguer les lampes à sodium haute pression des LED (Zheng et al. 2018) et cela avait bien fonctionné (84 % de distinction correcte) moyennant l'utilisation d'un logiciel tiers pour bien distinguer les différences entre ces deux sources lumineuses.

Il existe quelques limites d'utilisation des données de Jilin-1-3B (Zheng et al. 2018) :

- L'angle de prise de vue (off-nadir[5]) est inférieur à 10 degrés alors que Levin (Levin et al. 2014) a montré que cet angle pouvait avoir une importance cruciale sur la détection des lumières ;

[5] Les points sur la surface de la Terre qui se trouvent directement en dessous de la trajectoire du satellite sont appelés les points nadir. Le off-nadir désigne l'angle que forme le satellite en « regardant » à la vertical vers la terre. Un off-nadir de 0 signifie que le satellite est perpendiculaire à la surface observée (source landinf.com).

- la prise de vue en multi spectres peut provoquer une latence et entraîner une perte d'informations ;
- la sensibilité aux lumières sombres n'est que de 7 $E^{-7}W.cm^{-2}.sr^{-1}$ alors qu'elle est de $2E^{-11}W.cm^{-2}.sr^{-1}$ dans VIIRS. Ainsi Jilin 1-3B peut ignorer des zones faiblement éclairées ;
- Jilin-1-3B ne couvre que le spectre visible alors que pour des images nocturnes, il est préférable d'avoir également une bande spectrale couvrant le proche infrarouge, car certaines lampes (à incandescence, sodium et à iodures métalliques) ont une forte radiance dans la bande du proche infrarouge ;
- tel qu'évoqué au chapitre 2.3, la lumière artificielle de nuit couvre une plage dynamique très étendue entre les zones sombres et les sources lumineuse directes. Le capteur de Jilin-1-3B ne pouvant échantillonner cette étendue que sur 8 bits, cela pose des problèmes de saturation pour les sources lumineuses très importantes. Cette saturation entraîne ainsi une sous-estimation pour les zones fortement éclairées comme les centres commerciaux par exemple.

Les derniers satellites Jilin-1 en date lancés par la société chinoise CG Satellite et adaptés à la caractérisation des nuisances lumineuses sont les satellites Jilin-1-07 et Jilin-1-08. Ils ont été lancés le 19 janvier 2018. Il est notamment composé d'une bande panchromatique et de bandes dans le bleu, le vert, le rouge, le red edge (partie inférieure du proche infrarouge) et le proche infrarouge. Cette amélioration doit permettre de mieux distinguer les sources lumineuses (Zheng et al. 2018).

La résolution pour les satellites Jilin-1-07 ou 08 est identique à 03-B. L'étendue des bandes spectrales pour Jilin-1-08 est la suivante :

- bleu : 430 nm – 520 nm ;
- vert : 490 nm – 580 nm ;
- rouge : 580 nm – 730 nm.



Figure 15 : Exemple d'image satellite acquise par le groupe de satellite Jilin-1 au-dessus de la ville de Rome. Source : https://www.cgsatellite.com/imagery/luminous-imagery/

Le coût d'acquisition des images produites par Jilin1 est de 25,22 € HT.km^{-2}

Les sociétés La Telescop (https://www.latelescop.fr/) et Geo4i (http://geo4i.com/) sont distributeurs des données du satellite JILIN 1 en France (voir contacts au paragraphe 4 ci-dessous).

Le produit est livré sous un format « brut » (RPC[6] capteur). Il est possible de l'orthorectifier avec des outils comme qgis (georefenrer) ou OTB. Une présentation de OTB est disponible ici :

http://osgeo-fr.github.io/frog2013/presentations/thematique/12-Grizonnet/frog2013_otb.pdf

Il suffit de quelques points de référence d'éclairage pour aider à ortho-rectifier l'image.

Des sociétés comme La TeleScop ou Geo4i peuvent s'occuper de cette correction géométrique, livrer une image raster RGB et convertie en radiance W.m^{-2}.sr^{-1}.

La société La TeleScop a fait un test sur la ville de Nantes, cela est présenté ici :

https://www.latelescop.fr/2020/01/23/carte-de-luminosite-de-nantes/

[6] RPC : Rational Polynomial rectification. Une image qui contient des coefficients polynomiaux rationnels peut être orthorectifiée en latitude / longitude en convertissant dans cette unité de mesure les coordonnées des positions des lignes et colonnes de l'image.

Il est possible de déplacer le curseur pour voir les 2 cartes. Les quartiers sont classés par luminosité moyenne.

2.10 Satellite Luojia

Le satellite Luojia 1-01 (= LJ1-01) est un prototype universitaire chinois, de l'université de la désormais célèbre ville de Wuhan. Il a été lancé le 2 juin 2018.

Comparé aux données fournies par le capteur VIIRS/NPP, LUOJIA 1-01 offre une meilleure résolution et peut détecter une plus grande plage dynamique de couleurs (Jiang et al. 2018). Sa résolution est de 100 à 130 m au sol environ (Zhao et al. 2019).

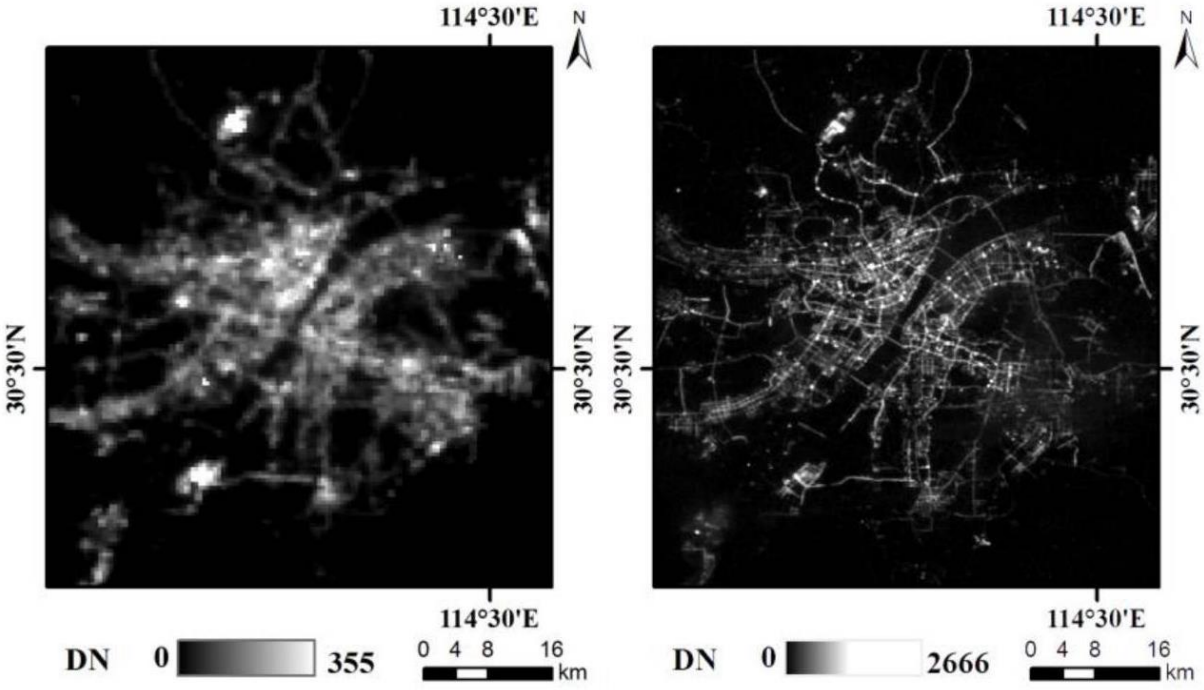


Figure 16 *: comparaison entre les images fournies avec le capteur VIIRS/NPP (à gauche) et LUOJIA 1-01 (à droite). D'après (Jiang et al. 2018).*

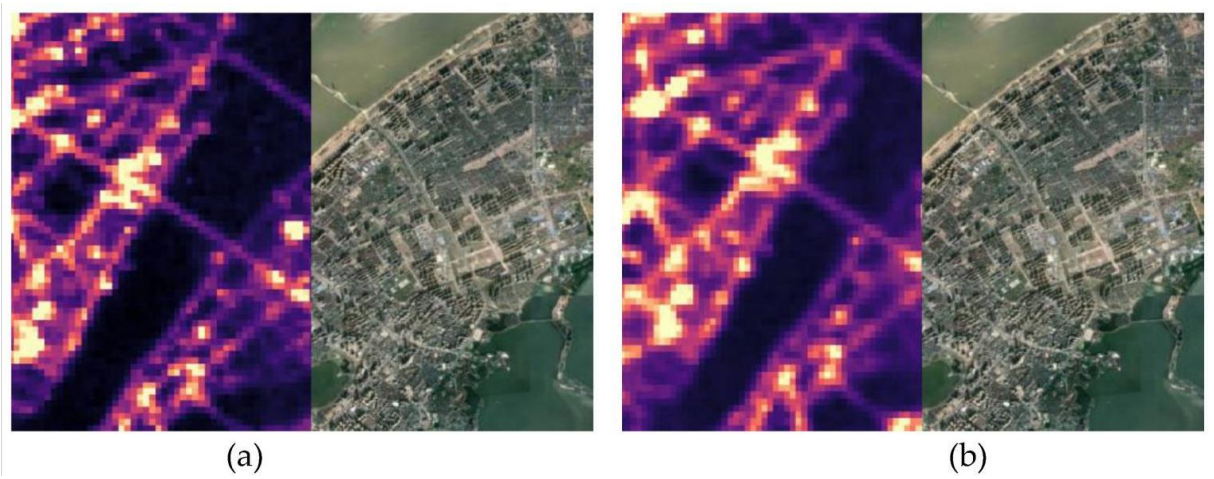


Figure 17 : Aperçu des images nocturnes produites par Luojia1-01. a : avant ortho-rectification ; b : après ortho-rectification. Source : (Jiang et al. 2018)

La donnée de Luojia 1-01 est gratuite. Les données sont disponibles sur le site de l'université de Wuhan à cette adresse :

http://59.175.109.173:8888/app/login_en.html

Il faut se créer un compte, attendre sa validation et les images sont ensuite librement accessibles.

D'après plusieurs sources concordantes, il n'y a plus eu d'acquisition depuis 2019. Les dernières données disponibles datent à ce jour (décembre 2020) de 2018.

En traçant un polygone sur la zone souhaitée, l'application indique les dalles d'images disponibles qu'il est alors possible de télécharger.

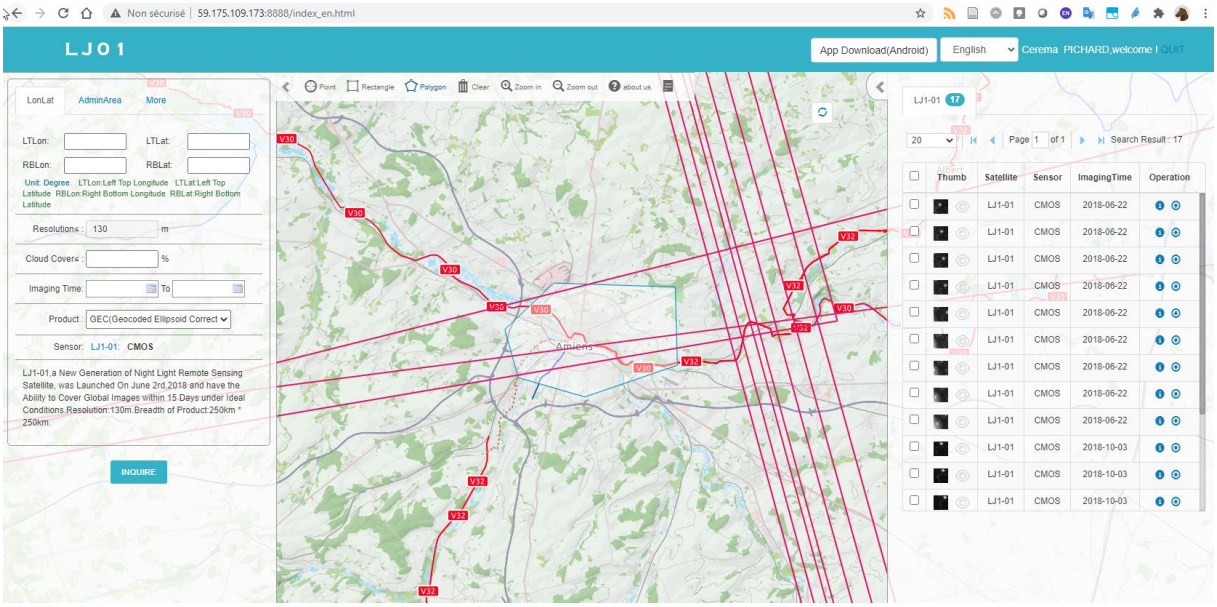


Figure 18 : Liste des dalles d'images disponibles en téléchargement après avoir tracé un polygone sur la zone d'étude (ici Amiens pour l'exemple). Source http://59.175.109.173:8888/app.

Il faut ensuite convertir les données en radiance.

Tel qu'indiqué sur le site mentionné ci-dessus, il est possible de convertir le format INT32 des images vers la radiance en procédant comme suit :

$$L = DN^{3/2} x 10^{-10}$$

Où L est la radiance d'entrée (W.(m^2 x srµ m)$^{-1}$) et DN étant le numéro (digital number) des images Luojia1-01.

Toutefois, nous avons pu faire des tests sur des images directement sans faire de calcul de variance et avoir un affichage tout à fait satisfaisant dans Qgis avec les réglages ci-dessous :

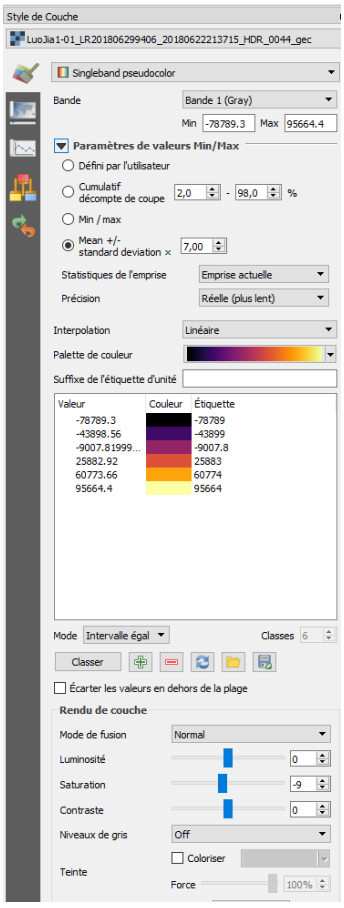


Figure 19 : Réglage du style de la couche raster Luojia sur Qgis permettant de faire apparaître les niveaux de radiance. La palette de couleur choisie est «inferno »

La TeleScop a accepté de nous fournir gracieusement une image en radiance convertie en W.m^{-2}.sr^{-1} ; projetée en Lambert 93 corrigée géométriquement.

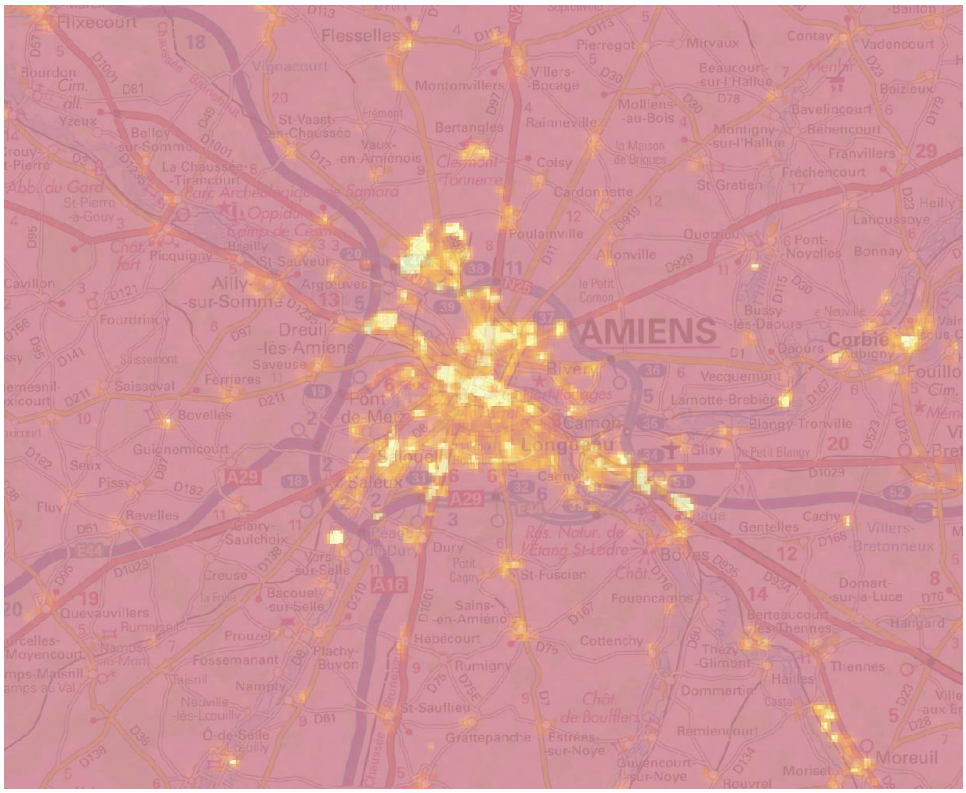


Figure 20 : Exemple du rendu du satellite Luojia 1-01 sur le secteur d'Amiens. Image gracieusement fournie par La TeleScop, en radiance et ortho-rectifiée. Acquisition satellitaire du 22 06 2018

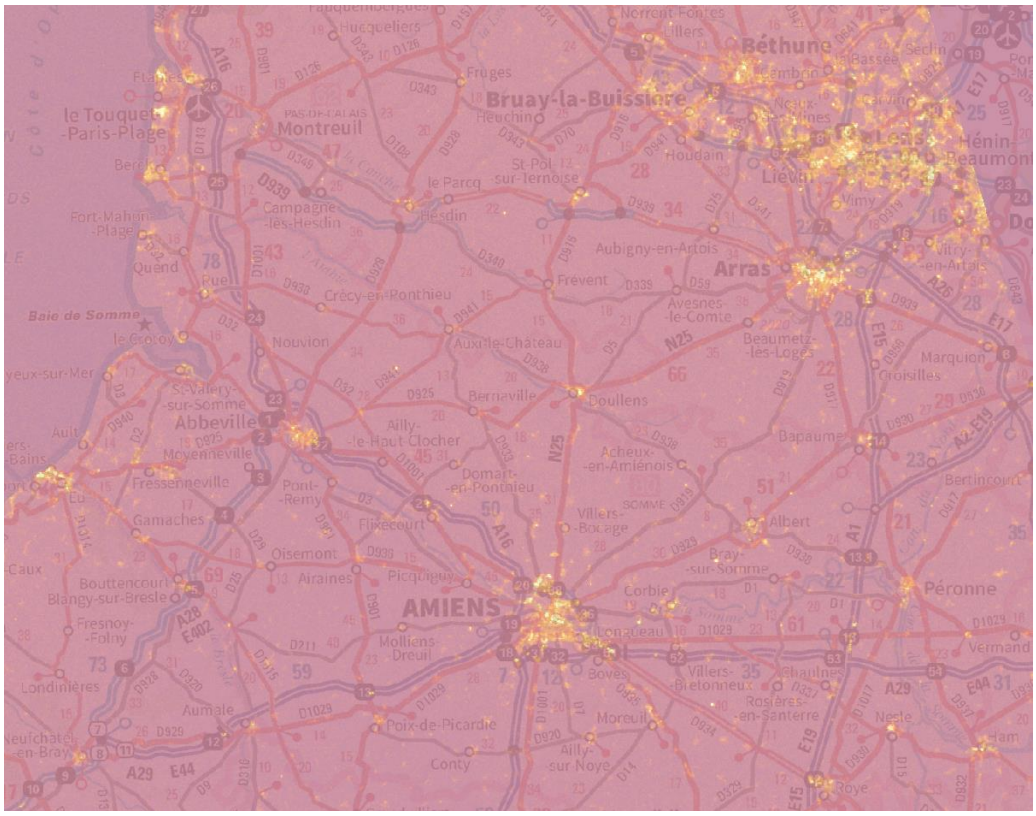


Figure 21 : Exemple de rendu du satellite Luojia 1-01 sur une partie des Hauts-de-France. Acquisition satellitaire du 22 06 2018. Cliché traité directement à partir du téléchargement sur le serveur de Wuhan (pas de rectification géométrique).

Ainsi, pour davantage de précision, la société La TeleScop peut se charger de rectifier la géométrie de l'image moyennant un temps à passer de l'ordre d'une demi-journée pour un territoire comme la Somme, soit un coût inférieur à 1000 € (La TeleScop, comm. pers.). Une image couvre environ 250 km x 250 km soit 62 500 km^2. Selon la répartition des dalles, le traitement d'une seule image peut suffire pour un seul département. Pour mémoire la superficie de la Somme est de 6170 km^2.

3 Synthèse

Tel que nous l'avons vu, il est important de bien définir son objectif avant de choisir vers quel type de satellite il faut s'orienter.

La différence entre la lumière visible depuis l'espace et celle perçue au niveau du sol doit toujours être prise en considération (Levin et al. 2020). Dans une perspective de préserver la faune sauvage nocturne, il est très important de disposer également d'outils pour caractériser la lumière émise horizontalement, par exemple celle provenant de l'éclairage intérieur des bâtiments. Il est nécessaire de croiser plusieurs sources d'informations, telles que des mesures au sol pour caractériser convenablement la pollution lumineuse (Deverchère, Vauclair 2019). Un champ de recherche s'ouvre pour disposer d'outils pertinents (Levin et al. 2020).

A l'heure actuelle, **dans l'objectif de définir un indicateur peu coûteux** de la pollution lumineuse pour les Hauts-de-France, à l'échelle d'un parc naturel régional, d'un département ou d'une grande métropole, alors Luojia 1-01 s'avère un choix judicieux. Il est en effet le seul satellite non commercial à fournir des informations sur l'éclairage nocturne. Malheureusement, sachant qu'il n'y a plus de nouvelles données depuis 2018, les données vont devenir rapidement obsolètes.

Si l'objectif est davantage focalisé vers les types de sources lumineuses, leurs intensités et leurs répartitions à l'échelle d'une commune, d'une communauté de commune ou d'une agglomération alors un satellite de meilleure résolution comme ceux du Jilin-1 sera davantage adapté. Les satellites Jilin-1 ont l'avantage d'être précis et la société qui les gère effectue des lancements de nouveaux modèles très régulièrement améliorant constamment la qualité et la fiabilité des images. S'agissant de satellites commerciaux, ils ont l'inconvénient d'être coûteux avec une zone couverte pour chaque image restreinte. Cela n'est de ce point de vue pas idéal pour couvrir de grands territoires avec un budget limité.

Enfin, tel que nous l'avons vu, la pollution lumineuse ne peut être caractérisée que par les données de radiance satellite. Il convient donc de recenser tous les outils disponibles et pertinents (ortholuminoplan, base de données des sources d'éclairage, utilisation d'un sky quality meter etc..) en fonction des objectifs recherchés.

4 Contacts

Société La TeleScop :

M. Bastien Nguyen Duy-Bardakji

Gérant – Acquisition

04 67 54 87 23

Siège social : 311 chemin de la Draye du Marbre 34170 Castelnau-le-lez

Bureau : Maison de la Télédétection 500 rue JF.Breton 34090 Montpellier

bastien.nguyen@latelescop.fr

https://www.latelescop.fr/

Société Geo4i :

M. Olivier Thiery

Responsable R&D

60, quai d'Amont 60100 Creil

olivier.thiery@geo4i.com

http://geo4i.com/

5 Bibliographie

ANDERSON, Sharolyn J., TUTTLE, Benjamin T., POWELL, Rebecca L. et SUTTON, Paul C., 2010. Characterizing relationships between population density and nighttime imagery for Denver, Colorado: issues of scale and representation. *International Journal of Remote Sensing*. 8 novembre 2010. Vol. 31, n° 21, pp. 5733-5746. DOI 10.1080/01431161.2010.496798.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE L'ÉCLAIRAGE, 2018. *Modélisation et mesures de la pollution lumineuse : quelle(s) méthode(s) pour quel(s) résultat(s) ?* [en ligne]. 18 septembre 2018. [Consulté le 28 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.afe-eclairage.fr/blogdelafe/modelisation-et-mesures-de-la-pollution-lumineuse-quelles-methodes-pour-quels-resultats/

BARA, Salvador, RIGUEIRO, Lago et LIMA, Raul C., 2019. Monitoring transition: Expected night sky brightness trends in different photometric bands. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. décembre 2019. Vol. 239, pp. 106644. DOI 10.1016/j.jqsrt.2019.106644.

CG SATELLITE SOCIETY, [sans date]. *Changguang Satellite Technology - CG Satellite company profile* [en ligne]. [Consulté le 4 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.cgsatellite.com/wp-content/themes/CG/images/CG%20Satellite%20Company%20Profile.pdf

DEVERCHÈRE, Philippe, VAUCLAIR, Sébastien et BONAVITACOLA, Michel, 2018. *Mesure et modélisation de la pollution lumineuse* [en ligne]. mars 2018. [Consulté le 28 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.darkskylab.com/publications.html

DEVERCHÈRE, Philippe, VAUCLAIR, Sébastien et NGUYEN DUY - BARDAKJI, Bastien, 2018. *Les différentes approches de la cartographie de la pollution lumineuse*. septembre 2018.

DEVERCHÈRE, Philippe et VAUCLAIR, Sébastien, 2019. *Modélisation de la pollution lumineuse à partir de données de radiance satellite* [en ligne]. avril 2019. [Consulté le 28 décembre 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.darkskylab.com/publications.html

GASTON, Kevin J., DUFFY, James P., GASTON, Sian, BENNIE, Jonathan et DAVIES, Thomas W., 2014. Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia*. décembre 2014. Vol. 176, n° 4, pp. 917-931. DOI 10.1007/s00442-014-3088-2.

HÄNEL, Andreas, POSCH, Thomas, RIBAS, Salvador J., AUBÉ, Martin, DURISCOE, Dan, JECHOW, Andreas, KOLLATH, Zoltán, LOLKEMA, Dorien E., MOORE, Chadwick, SCHMIDT, Norbert, SPOELSTRA, Henk, WUCHTERL, Günther et KYBA, Christopher C. M., 2018. Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1 janvier 2018. Vol. 205, pp. 278-290. DOI 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008.

JIANG, Wei, HE, Guojin, LONG, Tengfei, GUO, Hongxiang, YIN, Ranyu, LENG, Wanchun, LIU, Huichan et WANG, Guizhou, 2018. Potentiality of using Luojia 1-01 nighttime light imagery to investigate artificial light pollution. *Sensors*. 2018. Vol. 18, n° 9, pp. 2900.

KATZ, Yali et LEVIN, Noam, 2016. Quantifying urban light pollution — A comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sensing of Environment*. 1 mai 2016. Vol. 177, pp. 65-77. DOI 10.1016/j.rse.2016.02.017.

LEVIN, Noam, JOHANSEN, Kasper, HACKER, Jorg M. et PHINN, Stuart, 2014. A new source for high spatial resolution night time images — The EROS-B commercial satellite. *Remote Sensing of Environment*. 1 juin 2014. Vol. 149, pp. 1-12. DOI 10.1016/j.rse.2014.03.019.

LEVIN, Noam, KYBA, Christopher C. M., ZHANG, Qingling, SÁNCHEZ DE MIGUEL, Alejandro, ROMÁN, Miguel O., LI, Xi, PORTNOV, Boris A., MOLTHAN, Andrew L., JECHOW, Andreas, MILLER, Steven D., WANG, Zhuosen, SHRESTHA, Ranjay M. et ELVIDGE, Christopher D., 2020. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*. 1 février 2020. Vol. 237, pp. 111443. DOI 10.1016/j.rse.2019.111443.

WANG, Fengyan, ZHOU, Kai, WANG, Mingchang et WANG, Qing, 2020. The Impact Analysis of Land Features to JL1-3B Nighttime Light Data at Parcel Level: Illustrated by the Case of Changchun, China. *Sensors (Basel, Switzerland)* [en ligne]. 22 septembre 2020. Vol. 20, n° 18. [Consulté le 30 décembre 2020]. DOI 10.3390/s20185447. Disponible à l'adresse : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7576500/

ZHAO, Min, ZHOU, Yuyu, LI, Xuecao, CAO, Wenting, HE, Chunyang, YU, Bailang, LI, Xi, ELVIDGE, Christopher D., CHENG, Weiming et ZHOU, Chenghu, 2019. Applications of Satellite Remote Sensing of Nighttime Light Observations: Advances, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*. janvier 2019. Vol. 11, n° 17, pp. 1971. DOI 10.3390/rs11171971.

ZHENG, Qiming, WENG, Qihao, HUANG, Lingyan, WANG, Ke, DENG, Jinsong, JIANG, Ruowei, YE, Ziran et GAN, Muye, 2018. A new source of multi-spectral high spatial resolution night-time light imagery—JL1-3B. *Remote Sensing of Environment*. 15 septembre 2018. Vol. 215, pp. 300-312. DOI 10.1016/j.rse.2018.06.016.

Cerema Hauts-de-France
44 Ter rue Jean BART CS 20275. 59019 LILLE
Tel : 03 20 49 60 00 – mél. : DTerNP@cerema.fr

www.cerema.fr

Edition ; Fevrier 2021