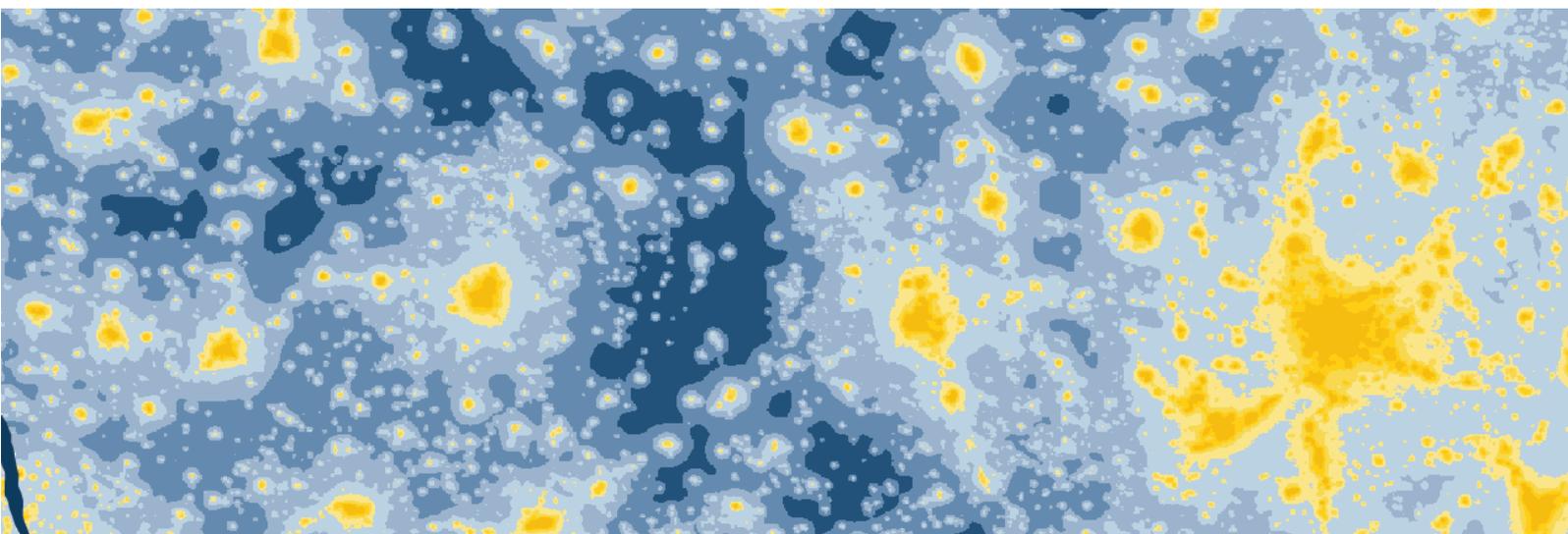




Mise à jour et extension de l'indicateur national de suivi de la pollution lumineuse



Rapport (mise à jour)

24 juin 2025



DarkSkyLab

Pascaou
31470 Fontenilles

06 42 44 81 60
info@darkskylab.com

Table des matières

1	Introduction	3
2	Méthodologie pour l'indicateur de cœur de nuit.....	5
2.1	Données utilisées pour la construction de l'indicateur	5
2.1.1	Données satellite basse résolution	5
2.1.2	Jeux de données annuels VNL V2	7
2.1.3	Radiance versus luminance	8
2.2	Modélisation de la luminance zénithale	11
2.2.1	Structure de la simulation	11
2.2.2	Diffusion des sources par convolution	13
2.2.3	Calibration du modèle	16
2.3	Extraction de l'indicateur	17
2.3.1	Définition de l'indicateur 3 classes.....	17
2.3.2	Formats possibles de l'indicateur	18
2.3.3	Production de l'indicateur	20
2.4	Logigramme des étapes de construction de l'indicateur	20
3	Indicateurs 3 classes de cœur de nuit	21
3.1	France Métropolitaine	22
3.2	Outre-mer.....	25
3.3	Régions	31
3.4	Départements.....	37
4	Indicateurs 3 classes d'extrémités de nuit	41
4.1	Méthodologie pour l'indicateur d'extrémités de nuit	41
4.2	France Métropolitaine	44
4.3	Régions	47
5	Indicateurs 8 classes	51
6	Précision de l'indicateur	52
7	Confrontation avec les mesures de terrain	55
8	Conclusion	62
	Annexe A – Code du script de calcul de l'indicateur	63
	Annexe B – Détail des indicateurs de cœur de nuit	69

1 Introduction

Cette nouvelle version du rapport « *Mise à jour et extension de l'indicateur national de suivi de la pollution lumineuse* » intègre une méthodologie différente pour le calcul de l'indicateur d'extrémités de nuit par rapport aux deux premières versions. Elle s'appuie sur un mécanisme original de détection des chutes de radiance mensuelle développé conjointement avec le CEREMA (voir la section 4 de ce document).

En 2021, l'Observatoire national de la biodiversité (ONB) a publié un **indicateur national de suivi de la pollution lumineuse**. Cet indicateur avait pour objectif de déterminer la proportion du territoire métropolitain fortement impacté par la pollution lumineuse (émission diffuse des lumières artificielles) en cœur de nuit par ciel clair. Pour faire suite à ce travail, et afin d'évaluer de manière plus complète l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité, il est apparu nécessaire de mettre à jour, d'explicitier et d'étendre cet indicateur selon les modalités suivantes :

- Utilisation des dernières données de radiance satellite disponibles (année 2023) pour la modélisation de la pollution lumineuse diffuse et le calcul de l'indicateur ;
- Analyse de l'évolution de l'indicateur année après année depuis 2014 en utilisant des données satellites homogènes qui rendent cette analyse pertinente ;
- Extension de l'analyse aux outre-mer :
 - Les deux départements et régions d'outre-mer (DROM) : la Guadeloupe et La Réunion ;
 - La Collectivité Territoriale de Martinique, la Collectivité Territoriale de Guyane et le Département de Mayotte ;
 - Cinq des six collectivités d'outre-mer (COM) : la Polynésie française, Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Saint-Pierre-et-Miquelon, Wallis-et-Futuna. Seules les Terres australes et antarctiques françaises ne sont pas prises en compte ;
 - La Nouvelle-Calédonie.
- Territorialisation de l'indicateur au niveau des régions et des départements, incluant l'analyse de l'évolution depuis 2014 ;
- Extension de l'indicateur aux situations d'extrémités de nuit. Etant donné l'adoption croissante des pratiques d'extinction de l'éclairage public en cœur de nuit, il est apparu nécessaire de modéliser la pollution lumineuse dans une situation d'extrémités de nuit (i.e. sans extinction) de manière à mieux prendre en compte les impacts possibles sur la biodiversité qui est généralement plus active en début et en fin de nuit qu'en cœur de nuit. Des indicateurs d'extrémités de nuit ont donc été développés (uniquement pour la France Métropolitaine et pour l'année 2023) ;
- Comparaison avec des mesures de terrain afin d'évaluer la pertinence de la modélisation utilisée pour le calcul des indicateurs ;
- Estimation de la précision de l'indicateur en mettant en œuvre une approche statistique liée à la variabilité des données de radiance satellite utilisées en entrée du modèle.

Ce document décrit l'ensemble des résultats obtenus et explicite la méthodologie utilisée.

1. La première section fournit une **description de la méthodologie** utilisée pour produire les indicateurs ;
2. La seconde section du document décrit les indicateurs obtenus pour tous les territoires et toutes les années dans une **situation de cœur de nuit** ;
3. La troisième section décrit quant à elle les indicateurs obtenus pour la France Métropolitaine pour l'année 2023 dans une **situation d'extrémités de nuit** ;

4. La quatrième section s'attache à évaluer la **précision de l'indicateur** en étudiant statistiquement la variabilité des données satellite qui sont utilisés pour la modélisation ;
5. Enfin, la dernière section **confronte des mesures de luminance du ciel réalisées sur le terrain avec les prédictions du modèle** utilisé pour le calcul de l'indicateur.

Toutes les données numériques des indicateurs présentés dans ce document sont fournies dans une feuille de calcul associée ceci afin de faciliter leur exploitation. Le nom de la feuille de calcul est Indicateur national de pollution lumineuse.xlsx. Les données sont organisées dans les 7 onglets décrits dans le tableau ci-dessous.

Onglet	Contenu
France cdn 3 classes	Indicateur 3 classes de cœur de nuit pour la France Métropolitaine et les outre-mer
Régions cdn 3 classes	Indicateur 3 classes de cœur de nuit pour les régions de France Métropolitaine
Départements cdn 3 classes	Indicateur 3 classes de cœur de nuit pour les départements de France Métropolitaine
France M. edn 2023 3 classes	Indicateur 3 classes d'extrémités de nuit 2023 pour la France Métropolitaine
Régions edn 2023 3 classes	Indicateur 3 classes d'extrémités de nuit 2023 pour les régions de France Métropolitaine
France cdn 8 classes	Indicateur 8 classes de cœur de nuit pour la France Métropolitaine et les outre-mer
France M. edn 2023 8 classes	Indicateur 8 classes d'extrémités de nuit 2023 pour la France Métropolitaine

Les fichiers SIG GeoTIFF de toutes les **cartes des indicateurs** présentées dans ce document sont fournis en complément de ce document. Ces fichiers sont classés dans 7 sous-dossiers décrits dans le tableau ci-dessous.

Dossier	Contenu
Classes de coeur de nuit 3 classes (France et outre-mer)	Indicateur 3 classes de cœur de nuit pour la France Métropolitaine et les outre-mer
Classes de coeur de nuit 3 classes (régions)	Indicateur 3 classes de cœur de nuit pour les régions de France Métropolitaine
Classes de coeur de nuit 3 classes (départements)	Indicateur 3 classes de cœur de nuit pour les départements de France Métropolitaine
Classes d'extrémités de nuit 3 classes 2023 (France Métropolitaine)	Indicateur 3 classes d'extrémités de nuit 2023 pour la France Métropolitaine
Classes d'extrémités de nuit 3 classes 2023 (régions)	Indicateur 3 classes d'extrémités de nuit 2023 pour les régions de France Métropolitaine
Classes de coeur de nuit 8 classes (France et outre-mer)	Indicateur 8 classes de cœur de nuit pour la France Métropolitaine et les outre-mer
Classes d'extrémités de nuit 8 classes 2023 (France Métropolitaine)	Indicateur 8 classes d'extrémités de nuit 2023 pour la France Métropolitaine

De même les fichiers SIG GeoTIFF des **rasters de luminance zénithale RGB et/ou de luminance zénithale en mag/arcsec² (NSB)** sont fournis dans 5 autres sous-dossiers décrits dans le tableau ci-dessous. Les rasters RGB des régions et des départements ne sont pas produits dans le processus car la modélisation de la luminance zénithale n'est pas réalisée spécifiquement à l'échelle de ces territoires mais extraite de la modélisation au niveau de la France Métropolitaine.

Dossier	Contenu
Rasters de coeur de nuit (France et outre-mer)	Rasters RGB et de NSB de cœur de nuit pour la France Métropolitaine et les outre-mer
Rasters de coeur de nuit (régions)	Rasters de NSB de cœur de nuit pour les régions de France Métropolitaine
Rasters de coeur de nuit (départements)	Rasters NSB de cœur de nuit pour les départements de France Métropolitaine
Raster d'extrémités de nuit 2023 (France Métropolitaine)	Raster RGB et de NSB d'extrémités de nuit 2023 pour la France Métropolitaine
Rasters d'extrémités de nuit 2023 (régions)	Raster de NSB d'extrémités de nuit 2023 pour les régions de France Métropolitaine

2 Méthodologie pour l'indicateur de cœur de nuit

Cette section décrit les données utilisées pour construire l'indicateur puis elle fournit des informations sur le traitement logiciel réalisé pour en déduire une estimation de la pollution lumineuse sur l'ensemble du territoire métropolitain. Elle montre ensuite précisément comment les données de pollution lumineuse sont analysées pour dériver un indicateur numérique unique qui correspond au pourcentage des territoires impactés ou fortement impactés par la pollution lumineuse.

2.1 Données utilisées pour la construction de l'indicateur

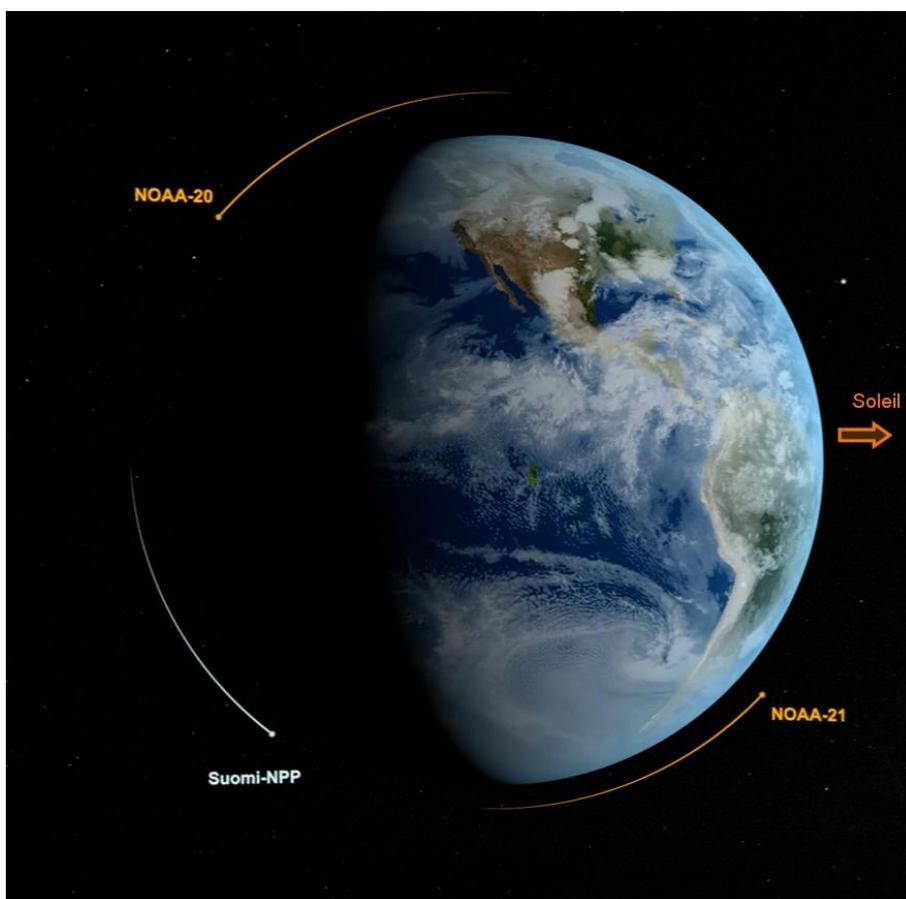
L'indicateur de suivi de la pollution lumineuse a pour principal objectif d'évaluer **l'évolution** de l'impact des nuisances lumineuses liées à l'éclairage extérieur public et privé. Cela implique qu'à l'échelle de plusieurs années il convient de disposer de sources de données fiables et qui garantissent de pouvoir comparer les résultats obtenus en appliquant la méthodologie de construction de l'indicateur au fil du temps. Il est virtuellement impossible pour cela de s'appuyer sur la disponibilité de bases de données de points lumineux d'éclairage extérieur. En effet, les bases de données d'éclairage public sont très souvent incomplètes et difficiles à obtenir et leur mise à jour laisse souvent à désirer. De plus, les bases de données pour l'éclairage privé n'existent quant à elles quasiment jamais. Il faut donc s'appuyer sur des données satellitaires obtenus lors de survols de nuit. Là aussi, il est impossible d'obtenir des images à haute résolution (de l'ordre du mètre ou de la dizaine de mètres) qui couvriraient chaque année tout le territoire métropolitain. Sans même parler du coût associé à l'obtention de telles données, l'infrastructure satellitaire disponible au travers de sociétés privées ne le permettrait pas.

2.1.1 Données satellite basse résolution

La seule solution réaliste consiste à utiliser des données satellite basse résolution (de l'ordre de quelques centaines de mètres) qui sont fournies par l'instrument VIIRS-DNB (*Visible and Infrared*

Imaging Suite - Day Night Band) embarqué à bord des satellites NOAA-20¹ et NOAA-21 (appelés initialement JPSS pour *Joint Polar-orbiting Satellite System*) ainsi que du satellite SNPP (*Suomi National Polar-orbiting Partnership*). Ces satellites sont opérés par la NASA et les données sont maintenant traitées et mises à disposition par l'EOG² (*Earth Observation Group*) au Colorado. L'EOG a développé une offre commerciale avec les données VIIRS-DNB mais continue à fournir des jeux de données mensuels et annuels gratuitement avec toutefois un décalage de plusieurs mois par rapport à l'offre commerciale.

Les satellites qui fournissent les données sont à orbite polaire et ils réalisent typiquement 14 orbites quotidiennes sur un plan fixe globalement dirigé vers le Soleil. La figure 1 ci-dessous illustre la position de l'orbite des satellites. Ces orbites polaires permettent au satellite d'imager l'ensemble de la surface terrestre quotidiennement. Comme le satellite survole l'hémisphère terrestre plongé dans l'obscurité selon un plan dirigé vers le Soleil, cela implique que **les données collectées correspondent à une situation de milieu de nuit**. Ce point est crucial car il implique que, par défaut, l'indicateur qui sera calculé à partir de ces données satellite ne sera représentatif que d'une situation en cœur de nuit après que l'éclairage public des communes qui pratiquent l'extinction ont éteint ou atténué les flux de leur éclairage public. Or il se trouve qu'en France de plus en plus de communes de taille significative adoptent des pratiques d'extinction ou d'atténuation des flux de l'éclairage public, essentiellement par souci d'économie (c'est le cas en particulier depuis 2023 suite aux fortes augmentations du coût de l'énergie). Il faut donc être conscient de cette spécificité et s'attacher à développer aussi un indicateur de pollution lumineuse en extrémités de nuit (qui sera donc significativement différent) en complétant les données satellite basse résolution au travers d'une technique qui sera décrite plus loin dans ce document.



¹ <https://en.wikipedia.org/wiki/NOAA-20>

² <https://payneinstitute.mines.edu/eog/>

Figure 1 – Orbite polaire des satellites NOAA et Suomi-NPP (crédit NASA³)

Il est important de comprendre que plusieurs facteurs limitent la qualité des données satellite VIIRS-DNB. Outre le fait qu'il s'agit de données basse résolution (1 pixel couvre une zone de 500 mètres environ au niveau de l'équateur), leur qualité est directement dépendante de la présence de nuages, d'aérosols et d'humidité dans l'atmosphère. Par exemple, sur certaines zones du globe, il est ainsi difficile d'obtenir une seule nuit sans nuages sur un mois donné (c'est le cas par exemple vers les tropiques). Aux latitudes de la France métropolitaine, il se peut que durant certains mois et dans certaines zones il y ait très peu de nuits sans nuages, ce qui va grandement limiter la qualité des données pour les mois considérés. De plus, dès que la latitude est élevée, les données deviennent plus bruitées lors des mois d'été puisque l'on n'atteint jamais la nuit astronomique avec le Soleil en-dessous de -18° sous l'horizon (c'est par exemple le cas de Paris durant les mois de juin et juillet près du solstice d'été)⁴. A cela s'ajoute des sources de bruit propres au détecteur lui-même comme des réflexions parasites qui se produisent dans certaines configurations géométriques entre La Terre, le Soleil et le satellite.

Les données fournies par les satellites lors de leurs prises de vue nocturne sont des données de **radiance**. La radiance a la dimension d'une puissance par unité d'angle solide et par unité de surface et elle est exprimée généralement en $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$ (nanowatt par centimètre carré et par stéradian).

2.1.2 Jeux de données annuels VNL V2

L'indicateur national de pollution lumineuse étant établi pour une année donnée (l'année 2023 à ce jour), il est judicieux d'utiliser un **composite annuel** de radiance qui est réalisé par l'EOG à partir de tous les composites mensuels de l'année considérée. L'algorithme utilisé pour assembler le composite annuel est assez sophistiqué puisqu'il vise :

1. A limiter le bruit dans le jeu de données résultant ;
2. A permettre une comparaison entre les jeux de données depuis 2014.

L'utilisation de jeux de données annuels VNL V2⁵ de l'EOG est donc bien adaptée à la détermination de l'indicateur de pollution lumineuse annuel. La figure 2 montre la carte de radiance VNL V2 pour l'année **2023**. La méthode utilisée pour créer les composites annuels VNL V2 est disponible sur le site de l'EOG⁶.

³ <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=5021&button=recent>

⁴ Il est d'ailleurs à noter que pour les latitudes au-dessus de 40° , les mois de mai, juin et juillet ne sont généralement pas utilisés pour la production des composites annuels de radiance, tout simplement car il n'y a pas de données ou bien celles-ci sont très bruitées. L'algorithme de l'EOG dit "*Skip months with less than 3 cloud-free observations*".

⁵ Toutes les données de radiance annuelles sont en libre téléchargement depuis : https://eogdata.mines.edu/products/vnl/#annual_v2

⁶ https://eogdata.mines.edu/products/vnl/VNL_v22_readme_20230707.pptx

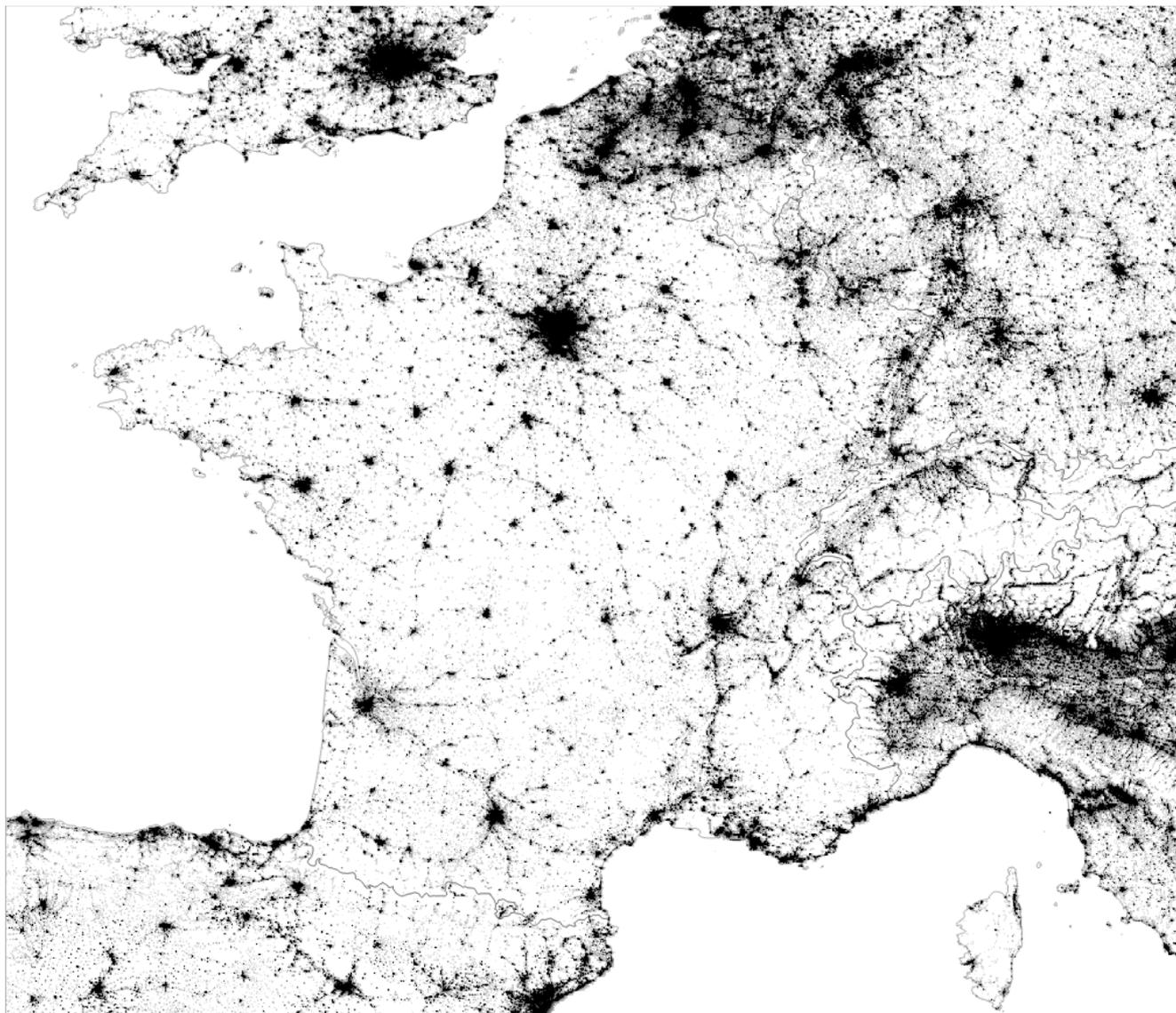


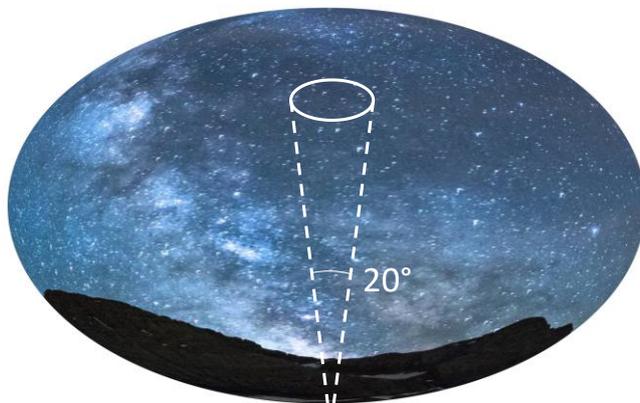
Figure 2 – Carte de radiance VNL V2 pour l'année 2023

Il serait possible de construire un jeu de données composite annuel à partir des composites mensuels en privilégiant par exemple une plus grande sensibilité aux zones de faible radiance, mais cela se ferait au détriment de la cohérence des jeux de données annuels entre eux. Or garantir une cohérence entre les données sur plusieurs années est impératif dans le cadre de la production des indicateurs de pollution lumineuse. Le fait de s'appuyer sur les jeux de données annuels VNL V2 de l'EOG fournit donc la meilleure garantie quant à la cohérence des indicateurs nationaux de pollution lumineuse à l'échelle de plusieurs années.

2.1.3 Radiance versus luminance

Connaître la radiance vue depuis l'espace sur un territoire grâce aux données satellite ne revient pas à connaître la pollution lumineuse telle qu'elle est vue depuis le sol ! En effet, le satellite enregistre la puissance lumineuse émise depuis le sol (soit directement, soit par réflexion), mais un observateur au sol ne voit pas du tout la même chose. La lumière émise dans l'environnement nocturne est diffusée par l'atmosphère et le fond du ciel devient plus brillant que le ciel nocturne naturel du fait de ce processus de diffusion dans toutes les directions. Lorsque des sources lumineuses plus ou moins puissantes et plus ou moins distantes sont présentes, un observateur au sol verra un ensemble de halos lumineux à différents azimuts selon la direction des sources et ces halos monteront à différentes

hauteurs au-dessus de l'horizon selon l'intensité des sources à l'origine des halos. Si le niveau de pollution lumineuse est significatif, même la zone au zénith au-dessus de l'observateur finira par gagner de la brillance.



Observateur

Lorsque l'on cherche à évaluer la pollution lumineuse a un endroit donné, une approche standard consiste à déterminer la brillance du ciel au zénith de cet endroit selon un angle de 20° centré sur le zénith. Cette brillance de ciel est une quantité photométrique (c'est-à-dire qu'elle prend en compte la réponse spectrale de l'œil) appelée la **luminance** et elle est exprimée en mag/arcsec² (magnitude par seconde d'arc au carré). Lorsque l'on étudie la pollution lumineuse, on appelle traditionnellement la luminance ainsi mesurée le **NSB** (pour *Night Sky Brightness*). Il s'agit d'une grandeur logarithmique inversée dérivée de la

magnitude photométrique largement utilisée en astronomie (qui est elle-même inspirée de la vision humaine). Dans le cadre de la mesure de la luminance du ciel nocturne sans présence de nuages, cette échelle va typiquement de 15 mag/arcsec² (ciel très brillant) à 22 mag/arcsec² (ciel naturel très sombre en dehors de la Voie lactée).

Le tableau de la figure 3 présente 8 classes de luminance du ciel avec plusieurs échelles qui permettent de comprendre facilement à quelle qualité de ciel chacune des classes correspond. A titre d'exemple, un ciel possédant une luminance zénithale de 21,4 mag/arcsec² sera considéré comme un ciel rural assez sombre avec 1200 étoiles visibles à l'œil nu environ et quelques détails détectables dans la Voie lactée en absence de Lune dans le ciel.

Classes de qualité	Échelle de luminance	Échelle d'urbanisation	Échelle stellaire	Échelle galactique	Échelle subjective	Échelle de luminosité	Échelle ONB
	<i>Luminance zénithale en mag/arcsec²</i>	<i>Environnement typique où cette qualité de ciel est rencontrée</i>	<i>Nombre d'étoiles visibles à l'œil nu par ciel clair et sans Lune</i>	<i>Visibilité de la Voie lactée par ciel clair et sans Lune</i>	<i>Énoncé subjectif sur la qualité de ciel nocturne</i>	<i>Luminosité du ciel nocturne sans nuages et sans Lune</i>	<i>Échelle de l'indicateur national</i>
1	≤ 19.5	Urbain dense	< 100	Invisible	Très mauvais	Très brillant	Mauvais
2	> 19.5 et ≤ 20.30	Urbain	280	Presque invisible	Mauvais	Brillant	
3	> 20.30 et ≤ 20.75	Suburbain dense	520	A peine visible	Dégradé	Fortement lumineux	
4	> 20.75 et ≤ 21.00	Suburbain	660	Visible au zénith	Passable	Lumineux	
5	> 21.00 et ≤ 21.25	Transition suburbain / rural	950	Affaibli à l'horizon	Moyen	Peu sombre	Moyen
6	> 21.25 et ≤ 21.50	Rural	1200	Quelques détails	Correct	Assez sombre	
7	> 21.50 et ≤ 21.70	Site sombre	2300	Nombreux détails	Bon	Sombre	Bon
8	> 21.70	Site très sombre	> 4000	Spectaculaire	Excellent	Très sombre	

Figure 3 – Classes de qualité de ciel et échelles de représentation de la pollution lumineuse

Dans le cadre de la construction de l'indicateur de pollution lumineuse de cœur de nuit, il va falloir évaluer en tout point des territoires étudiés le NSB que l'on peut atteindre **lors d'une nuit claire sans Lune de qualité moyenne**. Cette évaluation va se faire au travers d'une **simulation** qui va transformer les données de radiance satellite annuelles VNL V2 et produire une estimation du NSB que l'on est en droit d'attendre en chaque point de ces territoires. Le modèle utilisé pour réaliser cette transformation

est basé sur un processus de diffusion des radiances qui va simuler la diffusion de la lumière dans l'atmosphère.

Le résultat d'une telle simulation est montré dans la figure 4 pour le territoire métropolitain (hors Corse). Il a été produit à partir des données de radiance VNL V2 pour l'année 2023. On peut constater que le processus de diffusion des radiances change l'aspect de la carte par rapport à la figure 2, ceci même si deux échelles de couleur différentes sont utilisées : les sources de radiance sont en quelque sorte « diffusées », ceci d'autant plus qu'elles sont intenses. De nombreuses zones qui ne comportaient pas de radiance se voient attribuer des luminances zénithales significatives du fait de la contribution de plusieurs zones de radiance situées à proximité. L'échelle de couleurs utilisée pour représenter la luminance est fournie à droite de la carte avec les légendes de l'échelle d'urbanisation qui est décrite dans la table de la figure 3.



Figure 4 – Carte de pollution lumineuse produite par diffusion des sources de radiance pour l'année 2023

On verra dans la dernière partie de cette section comment l'indicateur est dérivée de la carte de luminance zénithale.

Remarque : Il est important de noter que la plus petite échelle spatiale à laquelle les résultats de la carte de NSB sont interprétables est du même ordre de grandeur que la résolution des données qui sont utilisées en entrée pour créer cette carte. Comme les données de radiance ont une taille de pixel de l'ordre de **500 mètres**, il serait illusoire d'essayer d'interpréter les données de NSB à une échelle inférieure à cette distance de 500 mètres.

2.2 Modélisation de la luminance zénithale

Afin de produire les cartes de luminance zénithale, DarkSkyLab a développé un logiciel appelé **Otus** qui implémente une heuristique rendant possible pratiquement le processus de diffusion des sources de radiance satellite sans utiliser des modèles complexes de diffusion de Rayleigh ou de Mie, ce qui serait totalement impraticable avec des territoires comprenant potentiellement des dizaines de milliers, voire des millions, de sources lumineuses. Le modèle implémenté dans Otus est calibré en utilisant des résultats de mesures en différents points d'un territoire.

Initialement, le modèle implémenté dans Otus s'appuyait sur la **loi de Walker** qui est une heuristique déterminée à la fin des années 1970 et qui relie le flux lumineux émis par les agglomérations à leurs populations (avec une pondération par différents paramètres d'ajustement). Toutefois, cette heuristique a été rapidement étendue dans Otus et au lieu de considérer les agglomérations à un niveau global avec leurs populations, Otus applique une heuristique similaire soit au niveau de sources lumineuses discrètes, soit au niveau de sources de radiance issues de données satellite ou d'orthophotographies.

La figure 5 montre l'interface du logiciel Otus avec les différentes sources de données possibles qui peuvent être utilisées en entrée.

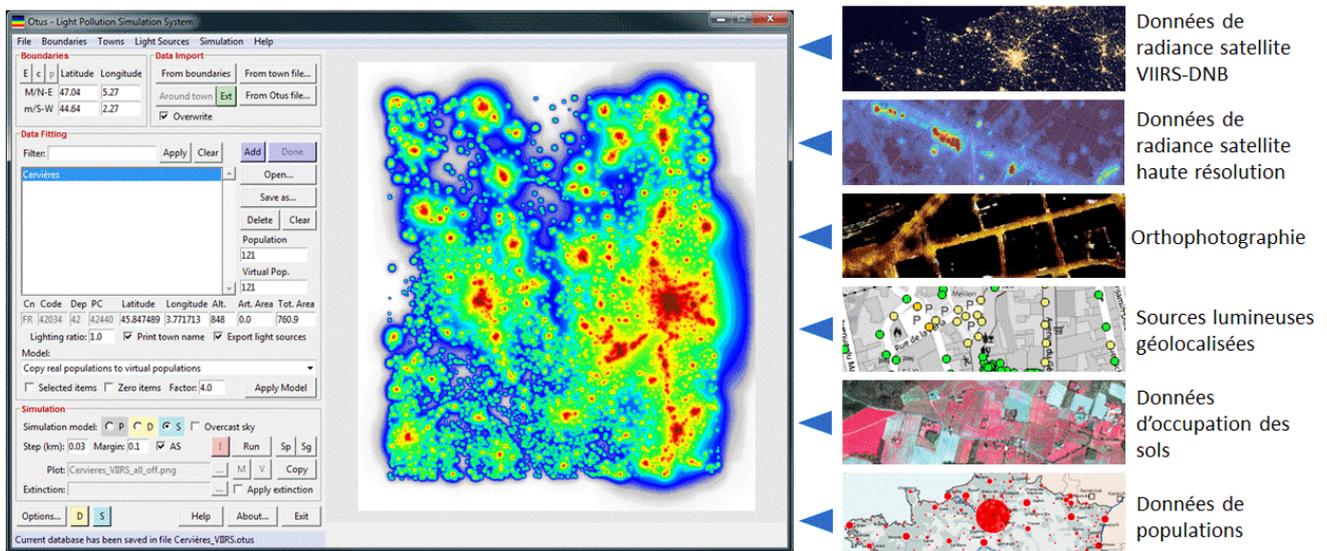


Figure 5 – Les différentes sources de données du logiciel Otus

2.2.1 Structure de la simulation

Le cœur du moteur de simulation Otus est basé sur la constitution d'une matrice qui maille le territoire selon un pas qui dépend de la taille du territoire étudié. Ce pas varie entre 50 mètres et 100 mètres environ selon la taille du territoire concerné. Dans le cas des simulations réalisées pour la construction de l'indicateur de pollution lumineuse, le pas de simulation utilisé est de 80 mètres. Cela permet de traiter l'ensemble de la France métropolitaine (avec la marge nécessaire puisque les territoires voisins contribuent à la pollution lumineuse sur le territoire français), ceci en un temps de calcul raisonnable.

Sur la grille de simulation sont placées les contributions géolocalisées des différentes sources de données utilisées dans la modélisation (points lumineux, pixels de radiance, ...). Ces contributions sont calculées en transformant les données d'entrée au moyen de relations spécifiques qui dépendent du type de données. Pour des points lumineux, la contribution est par exemple calculée à l'aide d'une fonction qui dépend des caractéristiques physiques de chaque point lumineux :

$$\text{contribution} = f_{p1}(\text{flux}, \text{type_lampe}, \text{ULR}, \text{albedo})$$

De même, pour des données de radiance satellite, la contribution est calculée à l'aide d'une fonction qui dépend de la radiance associée à chaque pixel :

$$\text{contribution} = f_{\text{rad}}(\text{radiance})$$

Le but est d'obtenir dans le cadre de simulations mixtes (i.e. qui mêlent plusieurs types de sources de données) des contributions homogènes. Pour les données de radiance satellite, qui représentent le seul type de données d'entrée pour la constitution de l'indicateur de pollution lumineuse, le centre de chaque pixel de radiance est calculé et une contribution correspondant à la valeur de radiance du pixel est positionnée sur la grille de simulation aux coordonnées calculées.

A titre d'exemple, un territoire d'une vingtaine de kilomètres de côté est montré sur la figure 6 avec les pixels de radiance positionnés sur la carte. La radiance va de 0,38 nW.cm⁻².sr⁻¹ pour les pixels de plus faible intensité (en bleu sombre) jusqu'à 8,3 nW.cm⁻².sr⁻¹ pour le pixel d'intensité maximale (en rouge foncé).



Figure 6 – Carte de radiance

La figure 7 montre une vue 3D de la grille de simulation correspondant au territoire de la figure 6, grille qui est constituée de 299 x 271 pixels (soit 81 029 pixels au total), chaque pixel couvrant une surface de 80 mètres par 80 mètres (la zone de simulation fait donc 23,92 x 21,68 km). L'intensité de chaque pixel est représentée sur la vue 3D dans l'unité standardisée utilisée pour la simulation. Les pics en vert correspondent aux pixels de plus faible intensité et les pics en rouge à ceux de plus forte intensité.

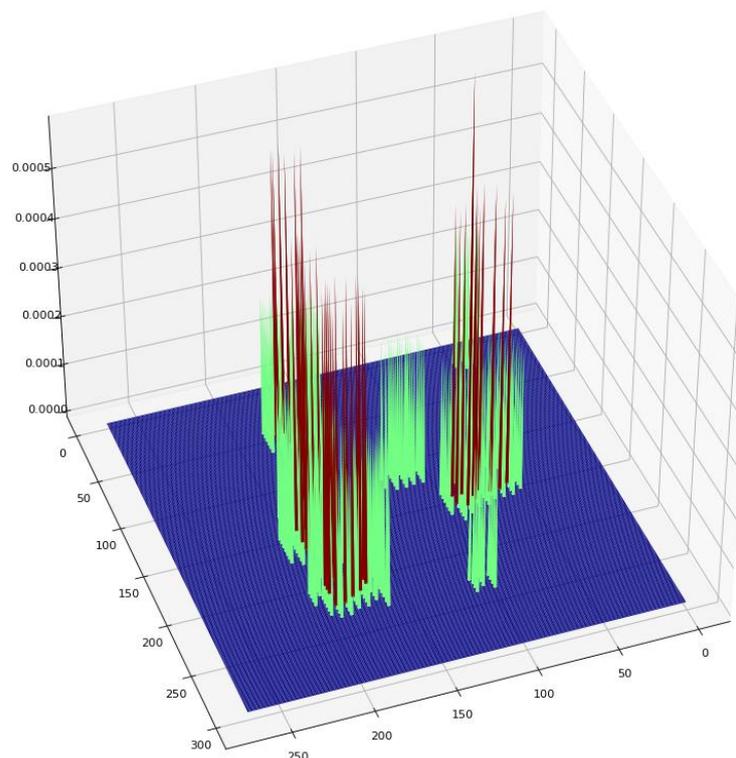


Figure 7 – Vue 3D de la grille de simulation montrant l'intensité de chaque pixel de radiance

2.2.2 Diffusion des sources par convolution

Sans entrer dans tous les détails du logiciel Otus, la simulation va consister à réaliser une convolution de la grille des pixels de radiance en utilisant un noyau de convolution calculé spécifiquement pour simuler une diffusion de la radiance dans l'atmosphère. Le modèle utilisé pour calculer le noyau de convolution prend en compte une distance caractéristique de diffusion ainsi que différents paramètres qui dépendent des données utilisées en entrée et des conditions atmosphériques choisies pour lesquelles on souhaite évaluer la pollution lumineuse produites par les sources spécifiées en entrée de la simulation. Dans notre cas, il s'agit de conditions moyennes de ciel clair en termes de charge aérosol et de taux d'humidité.

La figure 8 montre le noyau de convolution utilisé dans le cadre de notre exemple de simulation sur un petit territoire. Pour les besoins de la visualisation, l'échelle verticale sur le graphique a été modifiée en appliquant une transformation logarithmique.

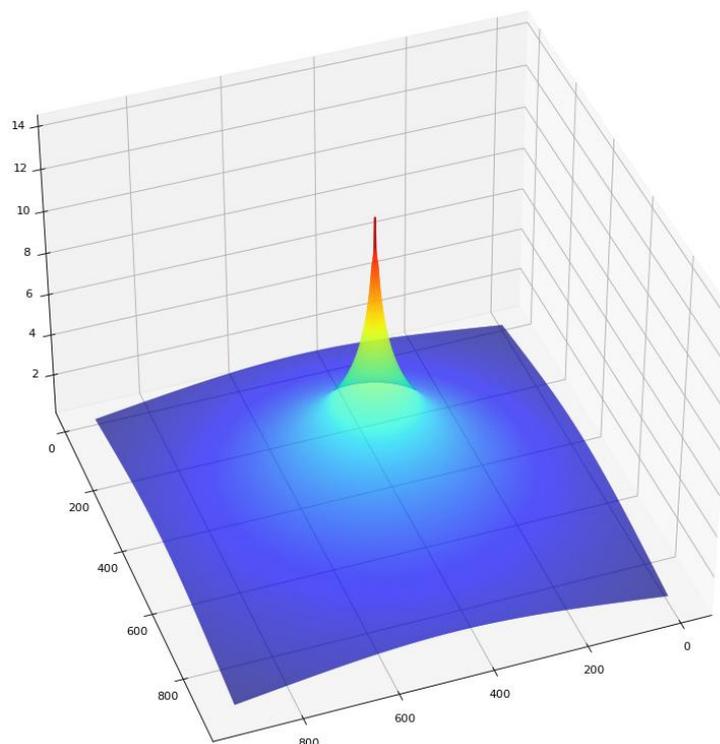


Figure 8 – Noyau de convolution utilisé pour la simulation

La convolution de la grille des pixels de radiance par le noyau calculé est réalisée à l'aide d'une transformation de Fourier rapide (FFT). La figure 9 montre le résultat obtenu pour notre exemple sachant que là aussi l'échelle verticale sur le graphique a été modifiée en appliquant une transformation logarithmique afin d'améliorer la visualisation.

L'évaluation de la luminance zénithale est obtenue à l'issue de la simulation dans une unité arbitraire appelée $10\log(q)$ dans le cadre du logiciel Otus, q étant une variable représentant la dégradation de la qualité du ciel par rapport au ciel naturel du fait de la présence de sources lumineuses. Le logiciel Otus transforme alors les valeurs obtenues dans la matrice issue de la convolution pour fournir une estimation de la **luminance zénithale** exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré en tout point du territoire simulé. Cette transformation est fondamentale pour pouvoir interpréter correctement le résultat de la simulation.

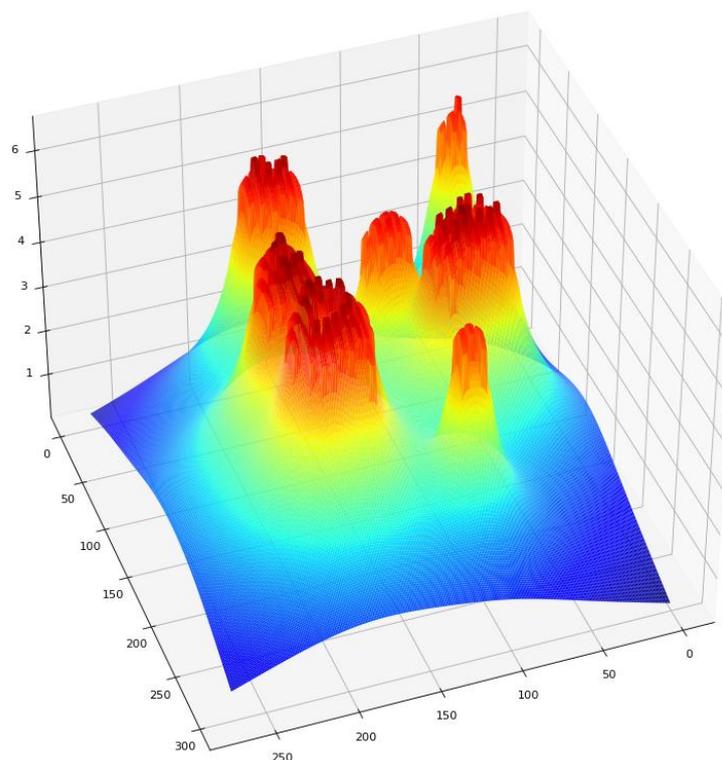


Figure 9 – Résultat de la convolution de la grille de radiance par le noyau calculé

La matrice issue de la convolution est alors transformée et sauvegardée dans un fichier GeoTIFF géoréférencé qui fournit l'estimation de luminance zénithale pour le territoire d'étude.

La figure 10 montre le résultat obtenu dans le cadre de notre exemple avec la même échelle de couleurs que pour la figure 4.

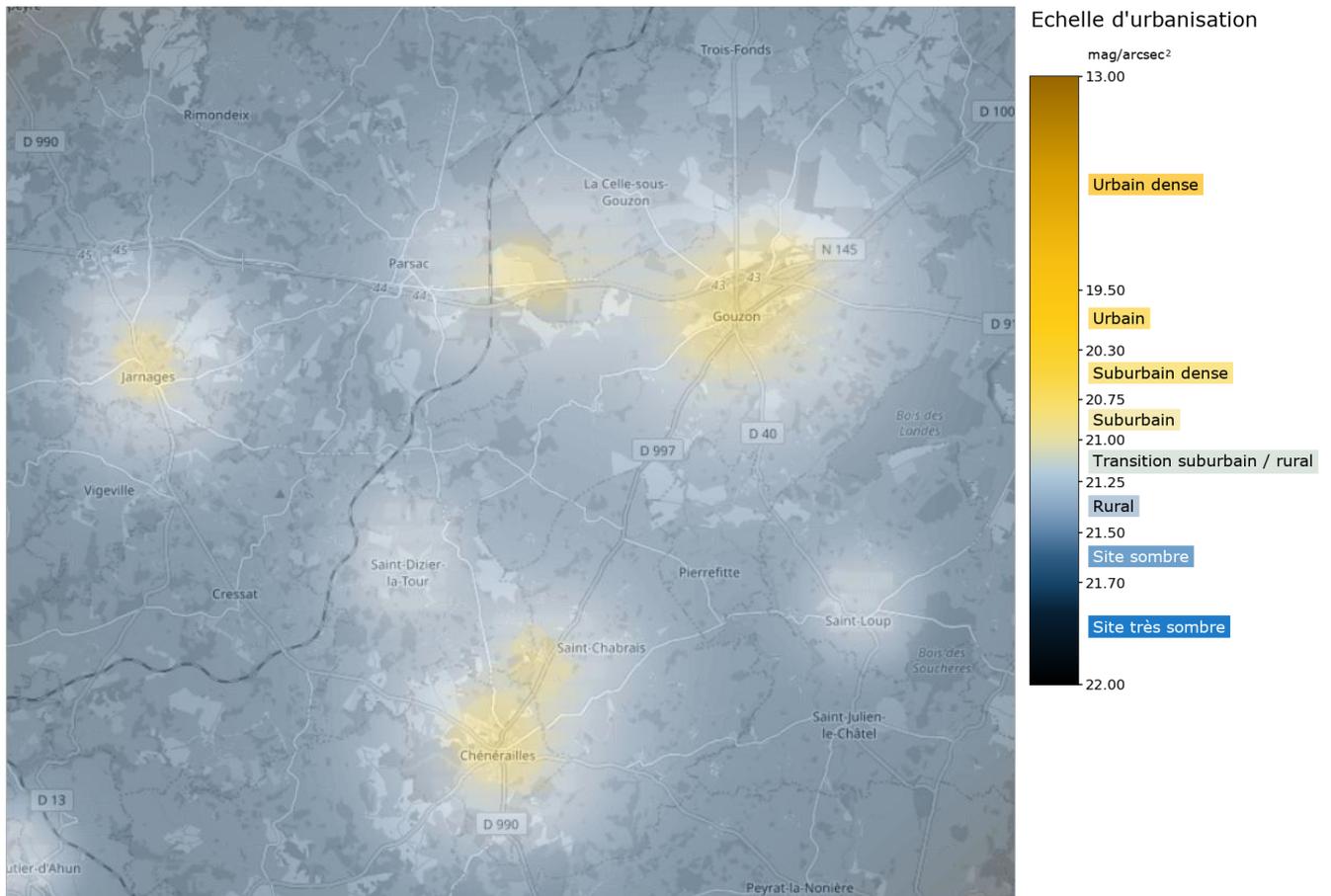


Figure 10 – Carte résultante de luminance zénithale sur le territoire d'étude

2.2.3 Calibration du modèle

A ce jour, le logiciel Otus possède un ensemble de paramètres permettant :

1. De transformer les données d'entrée (points lumineux, pixels de radiance, ...) en contributions standardisées dans la matrice de simulation ;
2. De calculer le noyau de convolution pour la diffusion des sources.

Dans le mode d'ajustement de son modèle, Otus produit automatiquement des courbes après simulation qui montrent l'accord obtenu avec en abscisse les valeurs de référence pour un ensemble de points géolocalisés (pour lesquels des valeurs de référence de NSB sont disponibles) et en ordonnée les valeurs de NSB calculées par Otus. Cet ajustement du modèle n'est réalisé qu'une seule fois et l'on considère qu'il est valide et homogène pour l'ensemble du territoire français.

Pour un ensemble de valeurs de référence sur un territoire pour lequel on dispose des bases de données des sources lumineuses et des données de radiance satellite, les paramètres du modèle sont spécifiés dans certaines plages prédéfinies et le modèle Otus est tourné de manière itérative. On cherche alors le jeu de paramètres qui minimise les écarts entre les données de référence et les résultats produits par simulation. La courbe de la figure 11a montre un exemple d'une telle courbe de calibration pour laquelle l'ajustement n'est pas du tout réalisé et où l'on a une forte surestimation des valeurs de NSB obtenues au travers du modèle par rapport aux relevés de terrain. La figure 11b montre le résultat de calibration obtenu après plusieurs itérations et la détermination des paramètres optimaux du modèle. On peut constater dans la figure 11b qu'il y a une bonne concordance entre les NSB de référence et les résultats de simulation.

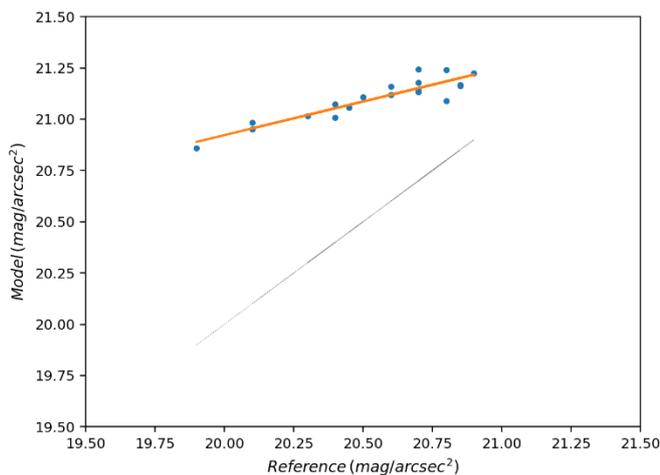


Figure 11a – Calibration non ajustée

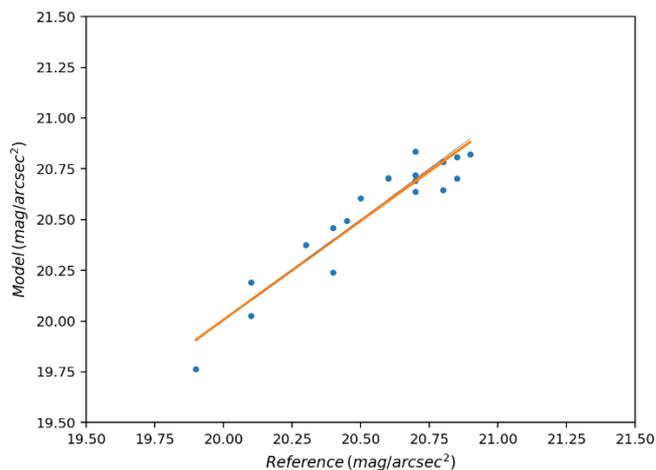


Figure 11b – Calibration ajustée

Lors de la production initiale de l'indicateur national au début de l'année 2021, DarkSkyLab avait utilisé un modèle Otus calibré à partir des données issues de *Light Pollution Map*⁷. En effet, DarkSkyLab disposait à ce moment-là de relativement peu de mesures de terrain facilement utilisables et les données *Light Pollution Map* faisaient référence dans les publications ayant trait à la modélisation de la pollution lumineuse des halos. Il est important de noter que la calibration du modèle utilisé par *Light Pollution Map* a été réalisée à partir de données SQM de terrain comme indiqué dans l'article associé *The new world atlas of artificial night sky brightness*⁸.

La comparaison ultérieure de ces données avec des mesures de terrain réalisées par DarkSkyLab a montré que la carte 2015 *Light Pollution Map* témoignait de luminances zénithales obtenues typiquement dans des conditions moyennes de ciel clair, ce qui est attendu étant donné la méthodologie utilisée pour réaliser les mesures de luminance avec des SQM, que ce soient par des observateurs amateurs ou professionnels. C'est pour cela que les prédictions de luminance zénithale issues du modèle Otus utilisé pour l'indicateur national sont toujours qualifiées de prédictions par « conditions moyennes de ciel clair ».

Le même modèle et la même calibration d'Otus ont été utilisés pour produire la première version de l'indicateur de cœur de nuit en 2021 (pour l'année 2020) et pour produire les indicateurs présentés dans ce document par souci de cohérence.

2.3 Extraction de l'indicateur

2.3.1 Définition de l'indicateur 3 classes

A l'issue du processus de simulation, on dispose d'un raster de luminance zénithale qui fournit une prédiction de la pollution lumineuse sur l'ensemble du territoire métropolitain. L'objectif est alors de définir des classes de luminance zénithale et de déterminer quelle est la fraction du territoire métropolitain qui appartient à chacune de ces classes.

Il a été décidé de définir 3 classes de luminance zénithale dans le cadre de l'indicateur national de suivi de la pollution lumineuse. Des couleurs spécifiques ont été retenues pour représenter chacune des 3 classes (leur code HTML est fourni dans le tableau ci-dessous).

⁷ <https://www.lightpollutionmap.info/>

⁸ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1600377>

Classe	Bornes de luminance zénithale	Description	Couleur
1	$NSB \leq 21 \text{ mag/arcsec}^2$	Territoire fortement impacté par la pollution lumineuse	#F5BD12
2	$21 < NSB \leq 21,5 \text{ mag/arcsec}^2$	Territoire impacté par la pollution lumineuse	#FAE688
3	$NSB > 21,5 \text{ mag/arcsec}^2$	Territoire peu impacté par la pollution lumineuse	#235379

Les valeurs des deux bornes de luminance utilisées pour définir les 3 classes (21,0 et 21,5 mag/arcsec²) ont été choisies sur la base d'un consensus largement accepté. La valeur de 21,0 mag/arcsec² est typiquement associée au passage d'un ciel suburbain à un ciel de transition suburbain / rural et la valeur de 21,5 mag/arcsec² est vue comme le passage d'un ciel de site rural à un ciel de site sombre.

2.3.2 Formats possibles de l'indicateur

L'indicateur national de suivi de la pollution lumineuse peut se présenter soit sous forme d'une carte où les zones du territoire appartenant aux différentes classes apparaissent dans les couleurs normalisées, soit sous forme d'un diagramme circulaire avec les 3 classes et leurs ratios respectifs.

La figure 12 montre la carte obtenue après création des 3 classes de luminance zénithale à partir du raster de luminance zénithale présenté en figure 4 (pour l'année 2023).

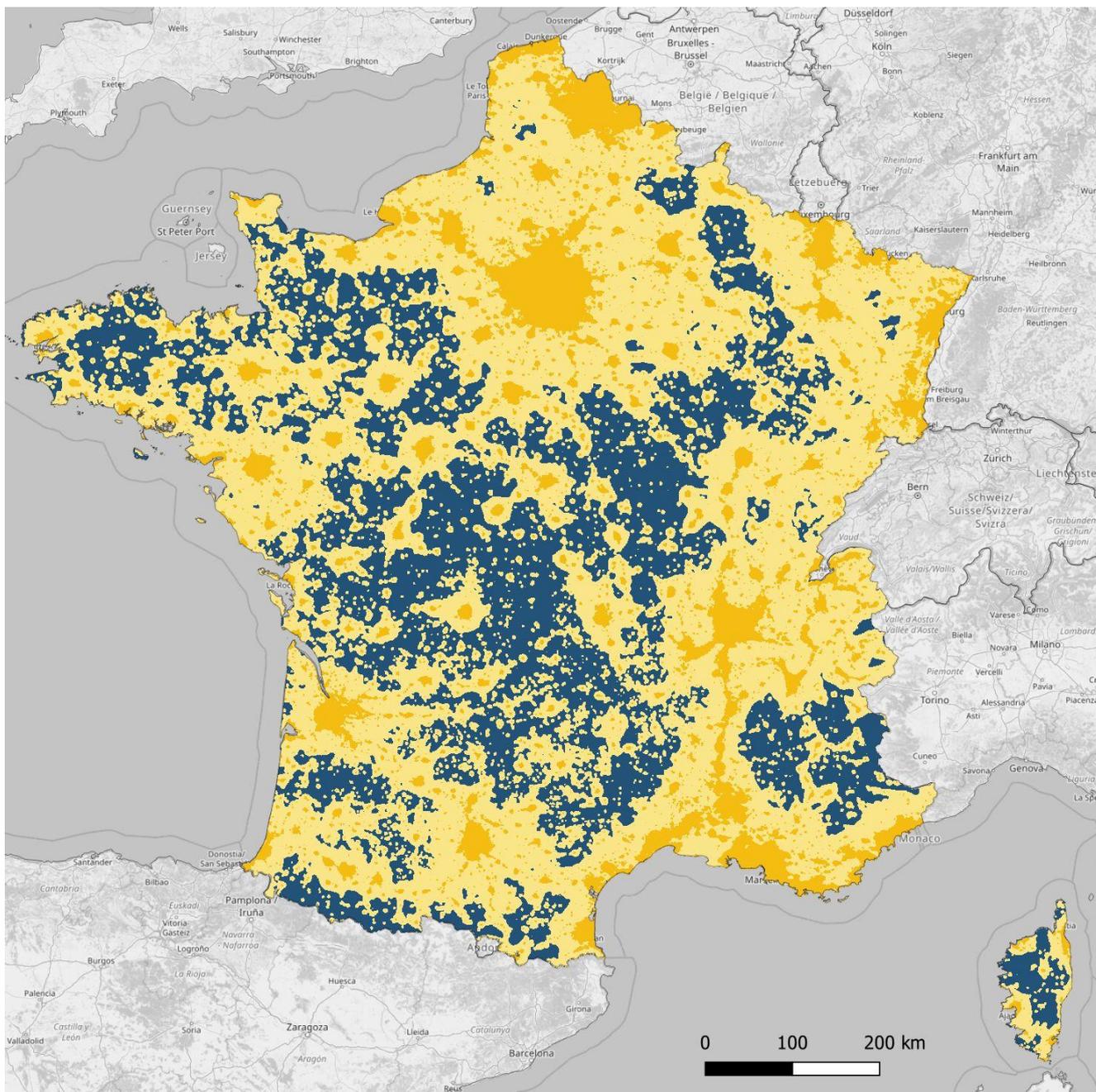


Figure 12 – Carte de France métropolitaine en 2023 avec les 3 classes de luminance zénithale

Les ratios attribués à chacune des classes sont indiqués dans le diagramme circulaire de la figure 13. Il s’agit des ratios pour l’année 2023 et l’on peut constater que 13,9% du territoire est en classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse), 57,7% est en classe 2 (territoire impacté par la pollution lumineuse) et 28,4% du territoire est en classe 3 (territoire peu ou pas impacté par la pollution lumineuse).

France Métropolitaine 2023 (cœur de nuit)

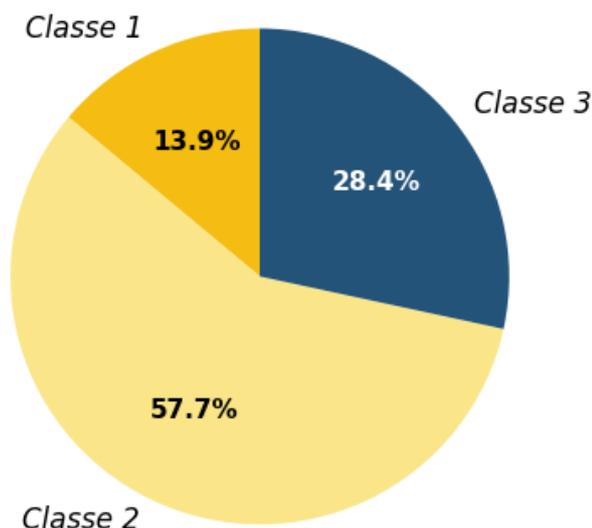


Figure 13 – Ratios des 3 classes de pollution lumineuse de l'indicateur pour l'année 2023

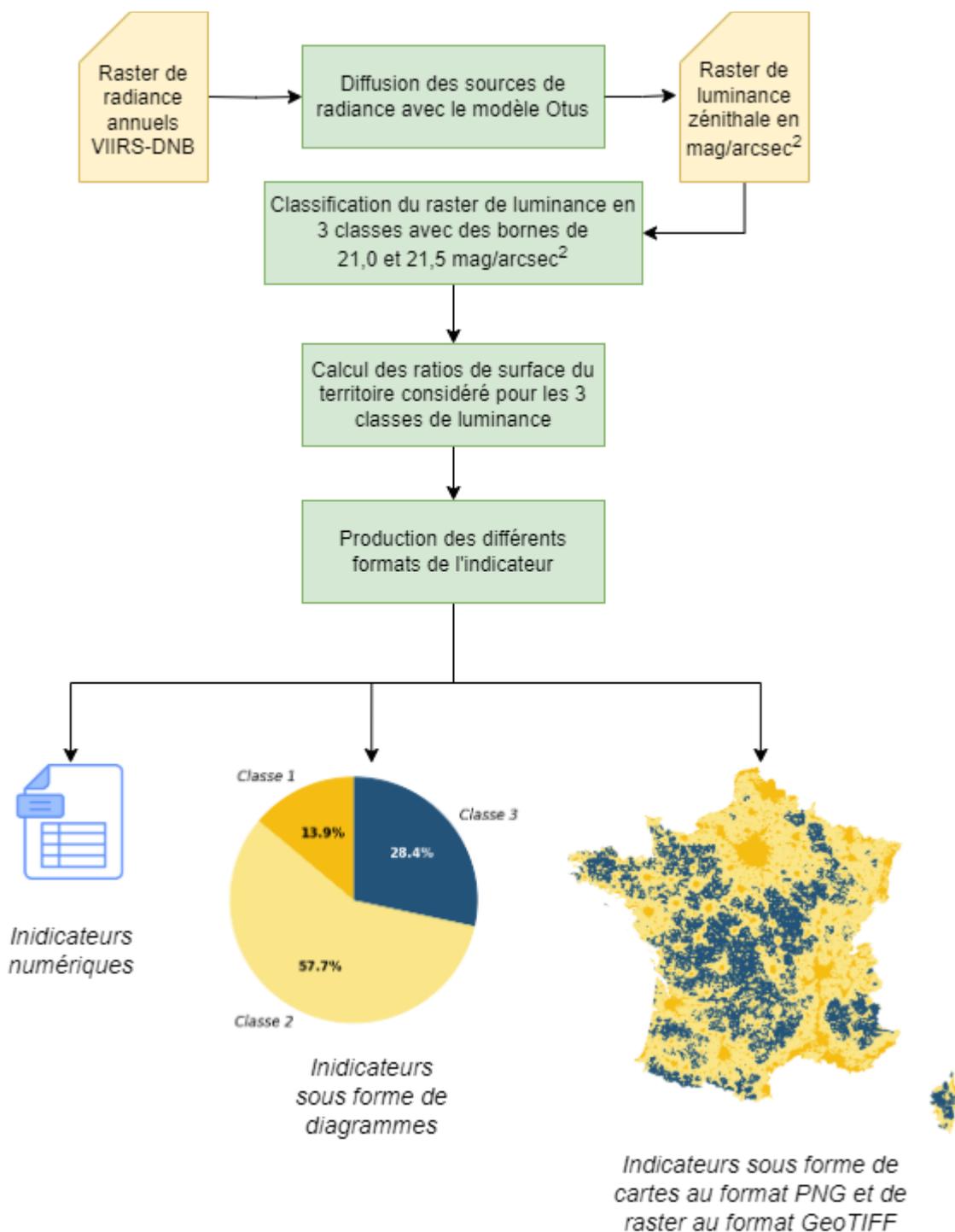
2.3.3 Production de l'indicateur

Le calcul des ratios des différentes classes ainsi que la production de la carte de l'indicateur et du diagramme circulaire correspondant sont réalisés automatiquement à l'aide d'un script Python. Cela évite d'avoir à réaliser manuellement toutes les tâches de classification d'un raster dans un logiciel d'information géographique, tâches qui peuvent être très fastidieuses. Le code de ce script est fourni en annexe de ce document.

Pour fonctionner correctement, le script doit être chargé dans l'éditeur de la console du logiciel QGIS version 3.20 ou supérieure. Le raster GeoTIFF issu de la simulation Otus à partir des radiances satellite doit lui aussi être chargé dans QGIS et ce raster doit être « clippé » sur les contours de la France métropolitaine (de manière bien sûr à ne considérer que le territoire français dans le calcul de l'indicateur). Le script Python utilisé est fourni en annexe A de ce document.

2.4 Logigramme des étapes de construction de l'indicateur

Le logigramme de la page suivante résume les différentes étapes de construction de l'indicateur.



3 Indicateurs 3 classes de cœur de nuit

La méthodologie décrite dans la section précédente a été appliquée aux 12 territoires retenus (France Métropolitaine, Guadeloupe, Guyane, Martinique, La Réunion, Mayotte, Nouvelle-Calédonie, Polynésie française, Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Saint-Pierre-et-Miquelon, Wallis-et-Futuna) puis déclinée aux 13 régions françaises et aux 96 départements de la Métropole. De plus, pour chaque territoire, la méthodologie a aussi été appliquée aux données satellite VIIRS-DNB de 10 années différentes entre 2014 et 2023. On arrive donc à un total de $(12 + 13 + 96) * 10 = 1210$ indicateurs différents.

Dans cette section, seuls les indicateurs de cœur de nuit pour la France Métropolitaine entre 2014 et 2023 sont décrits en détail. Les indicateurs des outre-mer ne sont fournis de manière détaillée que pour l'année 2023 (les évolutions sont simplement fournies dans un diagramme récapitulatif). Pour les régions, on ne fournit que les indicateurs pour l'année 2023 ainsi qu'un diagramme récapitulatif de l'évolution depuis 2014 pour chaque région. Pour les départements, seuls quelques exemples d'indicateurs sont fournis.

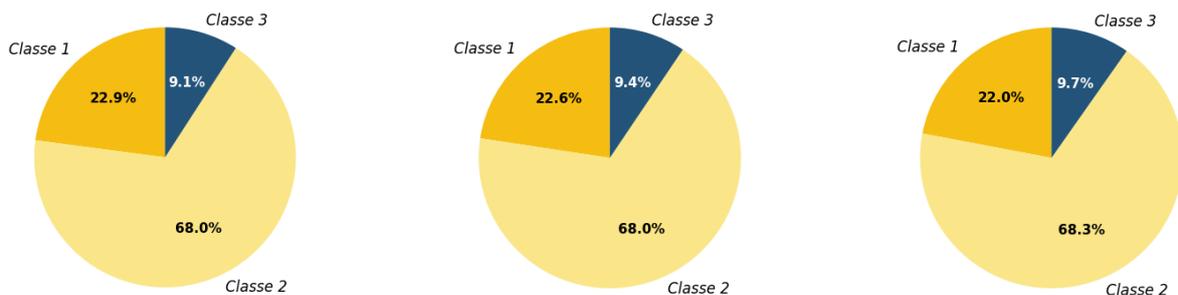
L'ensemble des indicateurs de cœur de nuit de tous les territoires (France Métropolitaine, outre-mer, régions et départements) pour chacune des 10 années sont fournis dans l'annexe B associée à ce rapport. Cette annexe comporte donc les 1210 indicateurs de cœur de nuit triés par territoires et par années.

3.1 France Métropolitaine

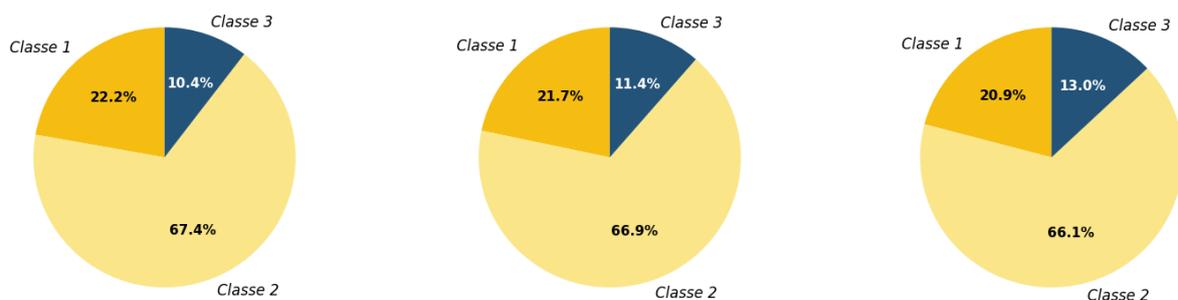
Le tableau suivant montre les 10 indicateurs de cœur de nuit pour la France Métropolitaine entre 2014 et 2023. A la suite du tableau, un récapitulatif des indicateurs de toutes les années est fourni. On peut constater l'évolution constante de l'indicateur de cœur de nuit vers un ciel de meilleure qualité au fil des années : la classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse) diminue et la classe 3 (territoire peu impacté par la pollution lumineuse) augmente. Cette évolution est particulièrement marquée pour l'année 2023 (on passe pour la classe 3 de 17,6% à 28,4%). Cela s'explique par le fait qu'un très grand nombre de communes ont mis en place des extinctions ou des gradations de puissance à la charnière entre les années 2022 et 2023 à la suite des très fortes augmentations du coût de l'énergie.

Entre 2020 (année utilisée pour la publication de l'indicateur initial) et 2023, le ratio de la classe 1 est passé de 20,3% à 13,9%. Il s'agit d'une amélioration de la qualité du ciel de cœur de nuit très significative.

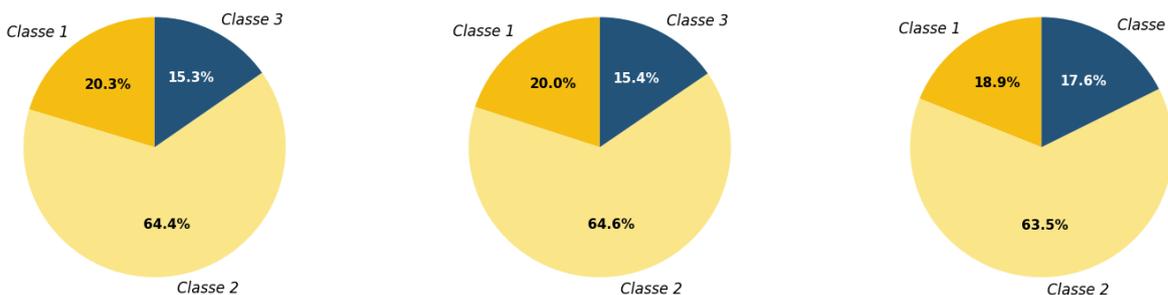
France Métropolitaine 2014 (cœur de nuit) France Métropolitaine 2015 (cœur de nuit) France Métropolitaine 2016 (cœur de nuit)



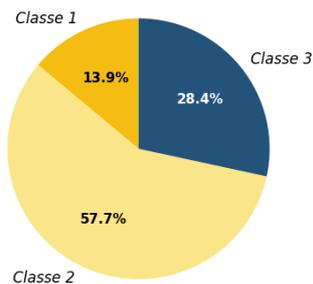
France Métropolitaine 2017 (cœur de nuit) France Métropolitaine 2018 (cœur de nuit) France Métropolitaine 2019 (cœur de nuit)



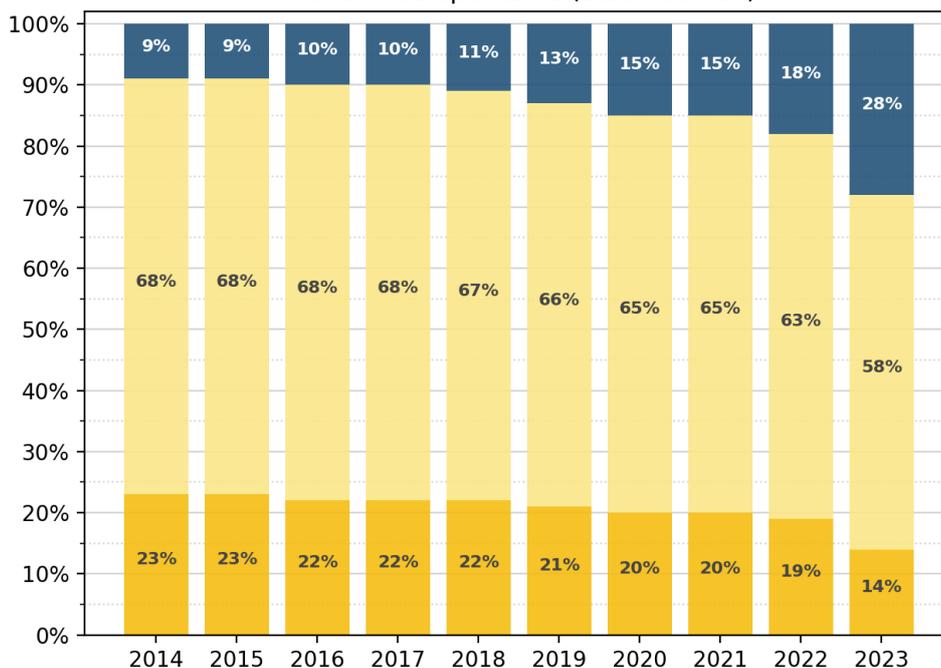
France Métropolitaine 2020 (cœur de nuit) France Métropolitaine 2021 (cœur de nuit) France Métropolitaine 2022 (cœur de nuit)



France Métropolitaine 2023 (cœur de nuit)



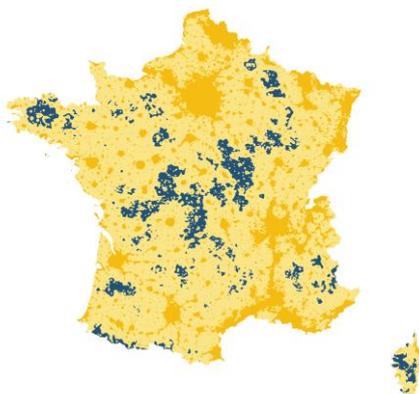
France Métropolitaine (cœur de nuit)



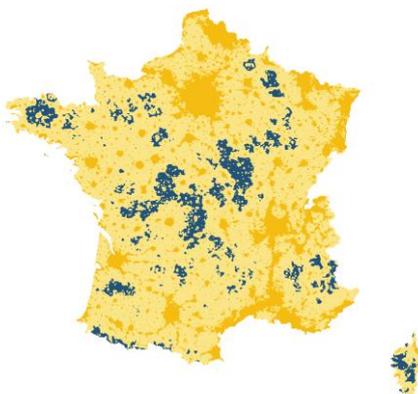
On peut s'attendre en 2024 à une légère inversion de tendance (c'est-à-dire que le ratio de la classe 1 va légèrement augmenter) dans la mesure à certaines communes ont décidé de ne plus continuer à mettre en œuvre des extinctions de cœur de nuit.

Le tableau suivant montre les 10 cartes de France Métropolitaine de 2014 à 2023 avec les différentes classes de cœur de nuit représentées sur tout le territoire en utilisant leur couleur normalisée (classe 1 en orange, classe 2 en jaune et classe 3 en bleu).

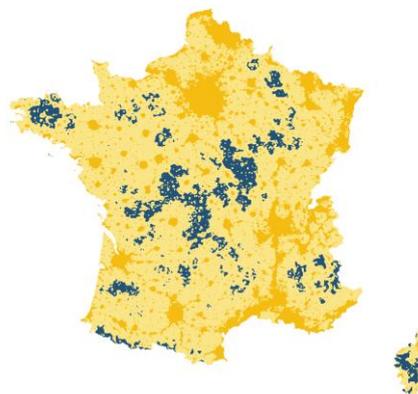
France Métropolitaine 2014 (cœur de nuit)



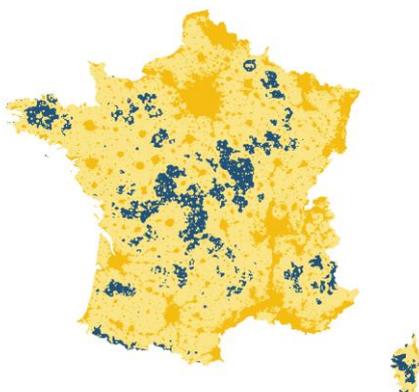
France Métropolitaine 2015 (cœur de nuit)



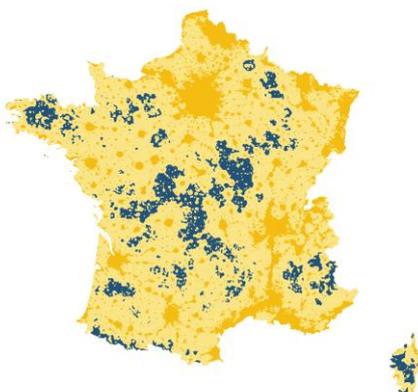
France Métropolitaine 2016 (cœur de nuit)



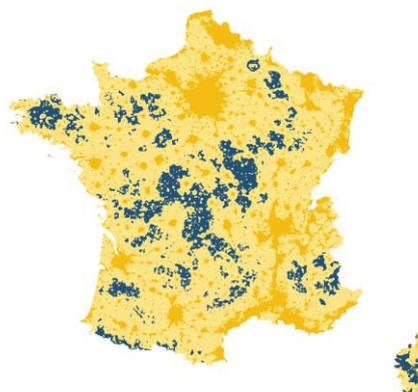
France Métropolitaine 2017 (cœur de nuit)



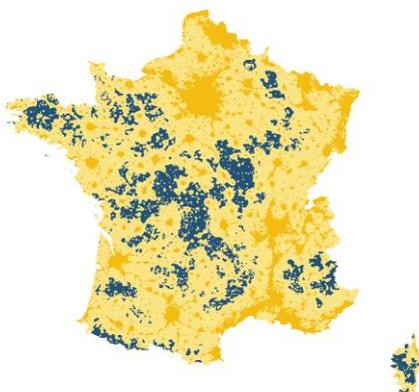
France Métropolitaine 2018 (cœur de nuit)



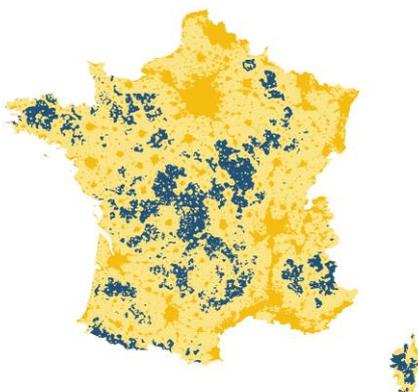
France Métropolitaine 2019 (cœur de nuit)



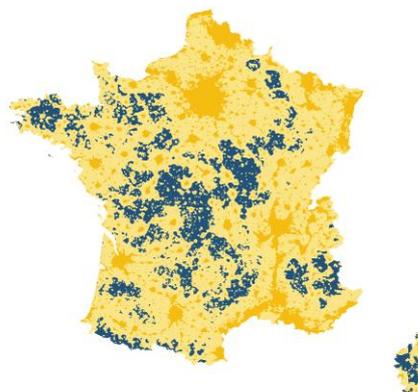
France Métropolitaine 2020 (cœur de nuit)



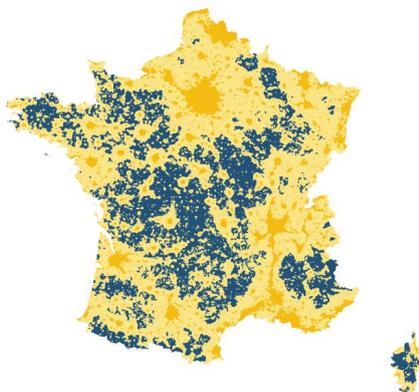
France Métropolitaine 2021 (cœur de nuit)



France Métropolitaine 2022 (cœur de nuit)



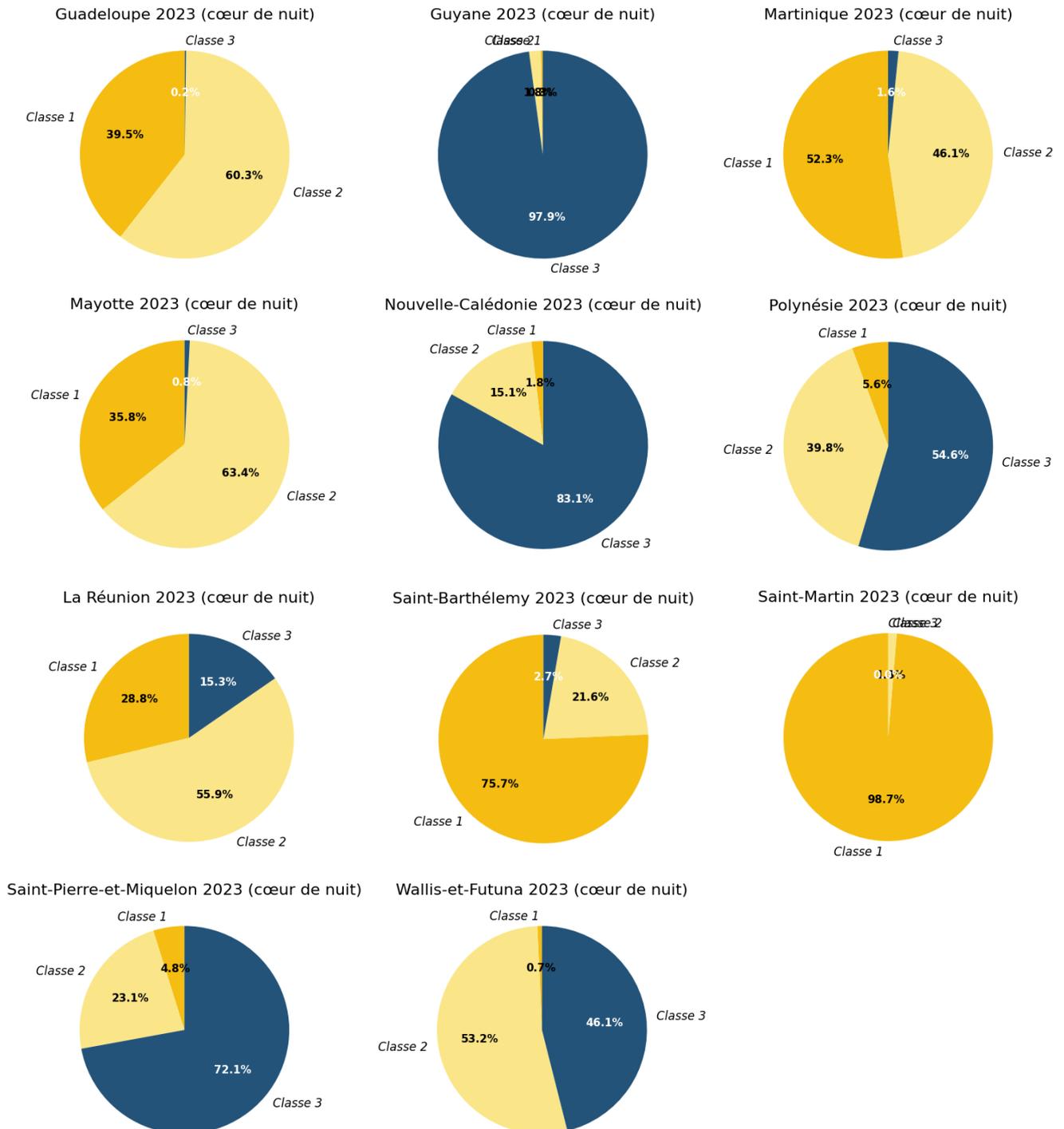
France Métropolitaine 2023 (cœur de nuit)

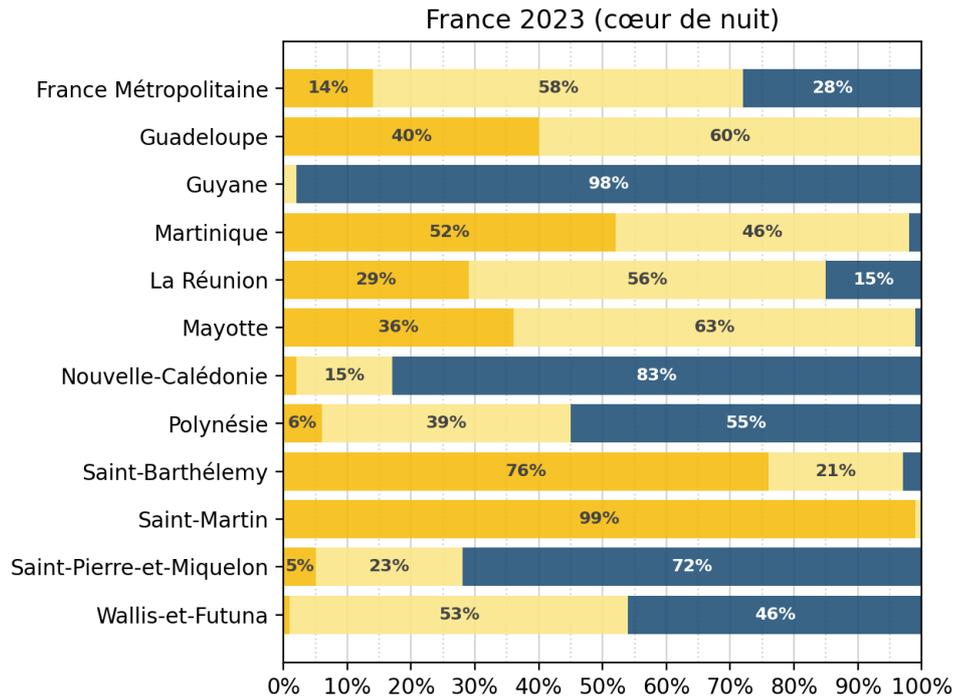


On peut constater visuellement la croissance de la classe 3 sur différentes parties du territoire, spécialement dans les zones rurales. Dans le nord de la France, on constate aussi une régression visible de la classe 1 (la plus polluée).

3.2 Outre-mer

Le tableau suivant montre les indicateurs de **cœur de nuit 2023** calculés pour chacun des 11 territoires ultramarins retenus. A la suite du tableau, un récapitulatif des indicateurs de tous ces territoires ainsi que de la France Métropolitaine pour l'année 2023 est fourni.

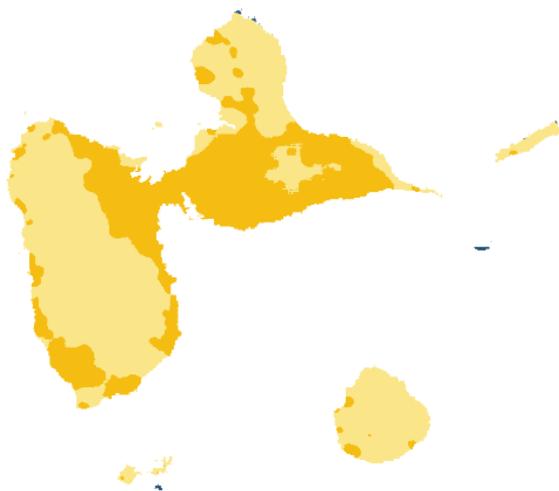




Comme on pouvait s’y attendre, les ratios de classes sont très contrastés. Les petits territoires ultramarins sont d’une façon générale très impactés par la pollution lumineuse avec un ratio de classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse) élevé. La Guyane a son territoire quasiment entièrement inclus dans la classe 3 (territoire peu impacté par la pollution lumineuse), ce qui est un peu moins vrai pour la Nouvelle-Calédonie du fait d’une urbanisation plus importante et de la présence de nombreuses mines avec des éclairages puissants.

Les cartes des classes sur les 11 territoires ultramarins pour la situation de cœur de nuit pour l’année 2023 sont fournies ci-dessous (avec des échelles bien sûr très différentes).

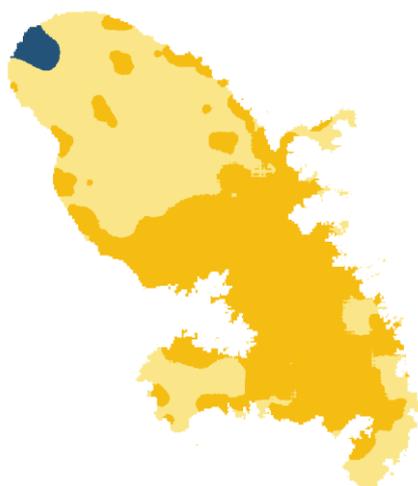
Guadeloupe 2023 (cœur de nuit)



Guyane 2023 (cœur de nuit)



Martinique 2023 (cœur de nuit)



Nouvelle-Calédonie 2023 (cœur de nuit)



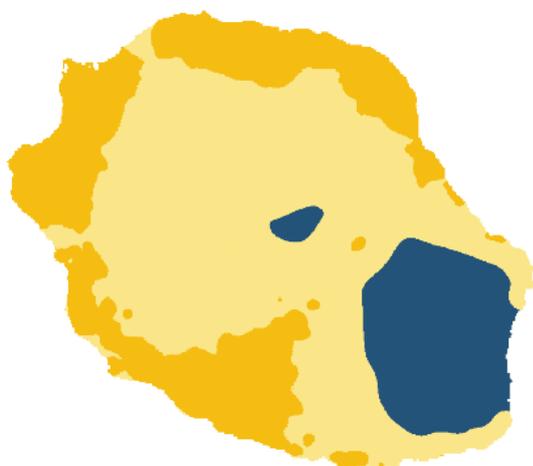
Mayotte 2023 (cœur de nuit)



Polynésie 2023 (cœur de nuit)



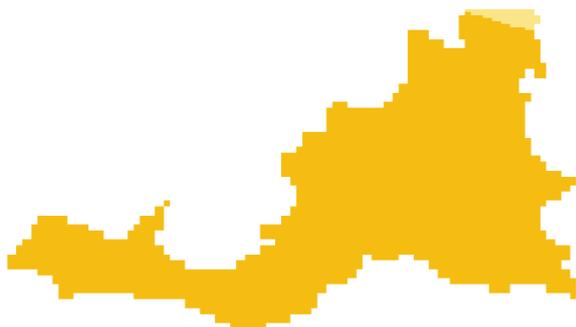
La Réunion 2023 (cœur de nuit)



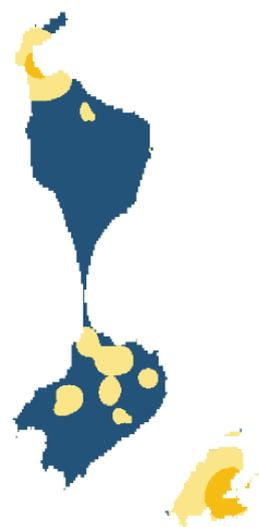
Saint-Barthélemy 2023 (cœur de nuit)



Saint-Martin 2023 (cœur de nuit)



Saint-Pierre-et-Miquelon 2023 (cœur de nuit)

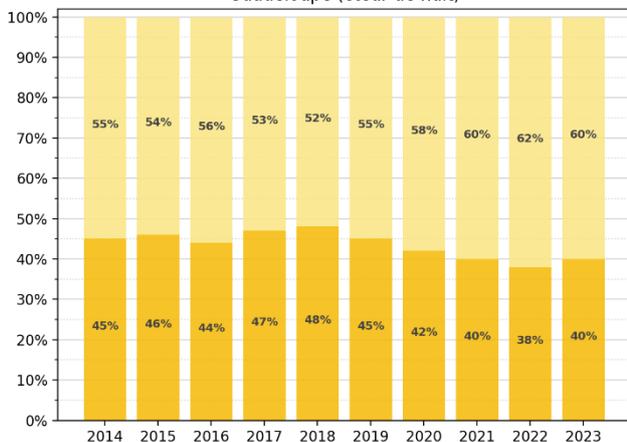


Wallis-et-Futuna 2023 (cœur de nuit)

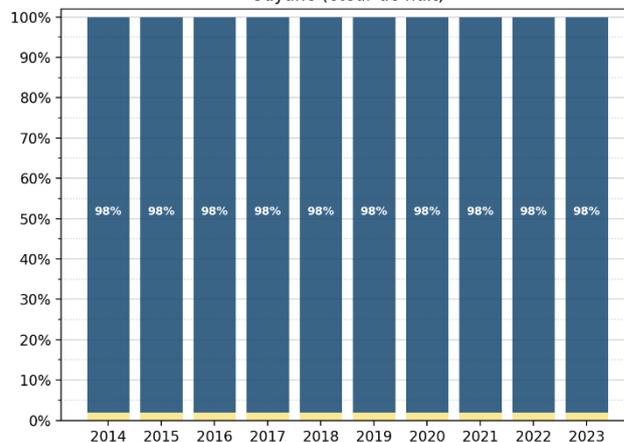


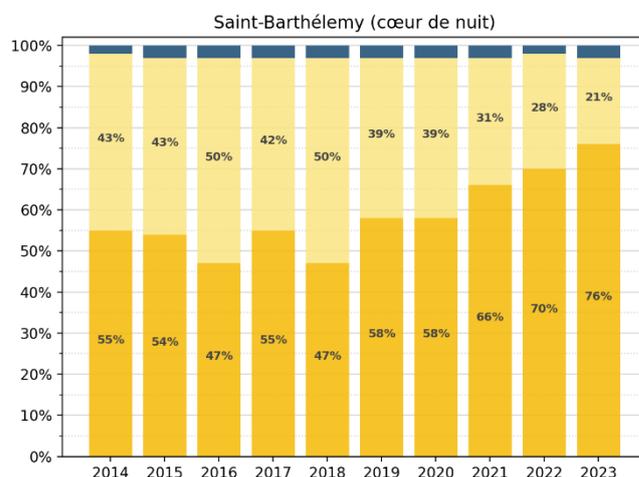
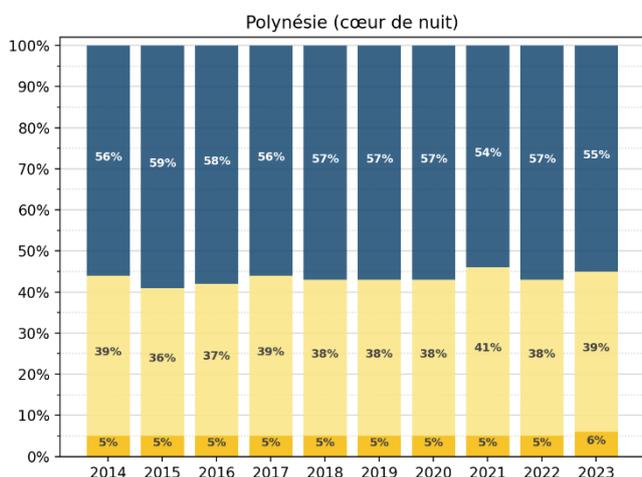
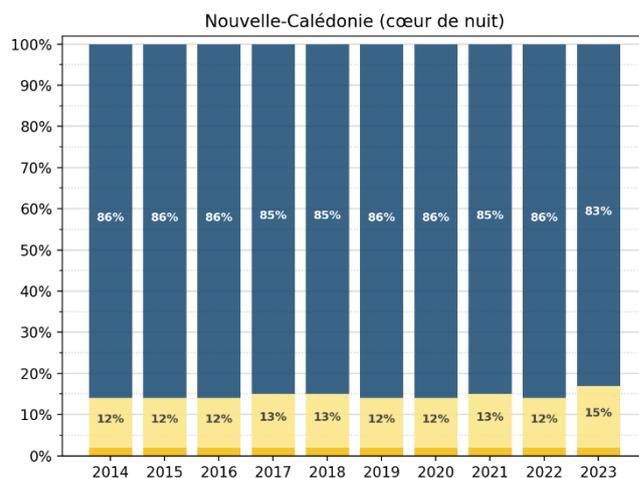
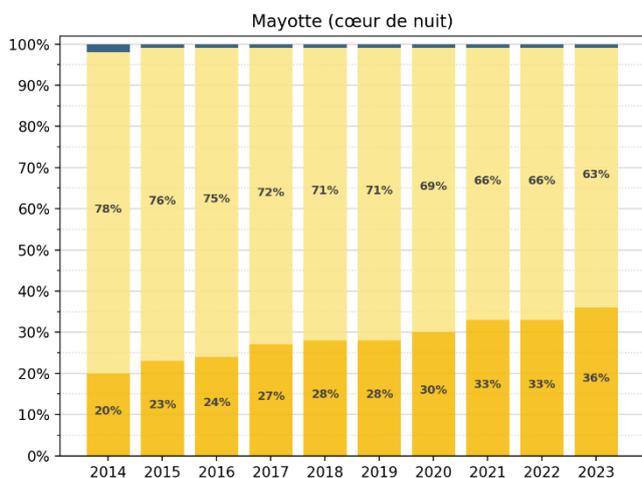
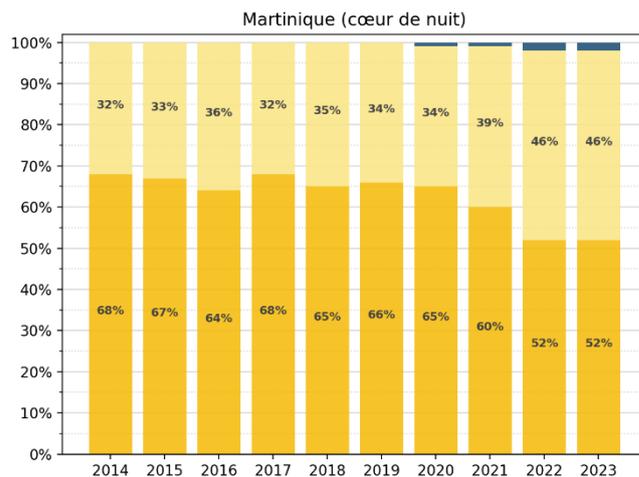
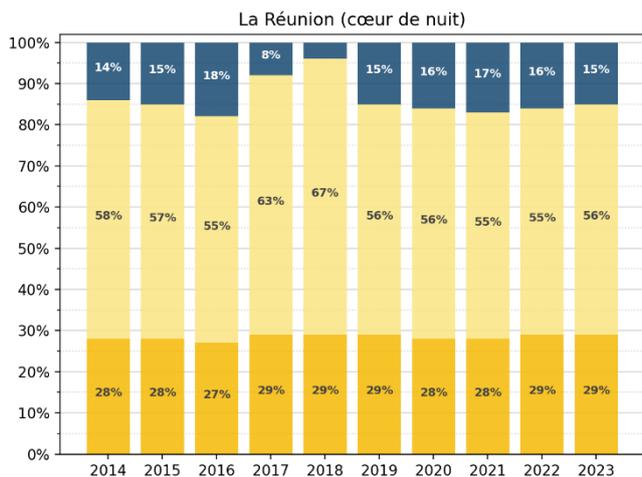
Le tableau ci-dessous montre l'évolution des classes sur les différents territoires ultramarins au fil des années entre 2014 et 2023 pour la situation de cœur de nuit. Là aussi, les profils sont très contrastés selon les territoires.

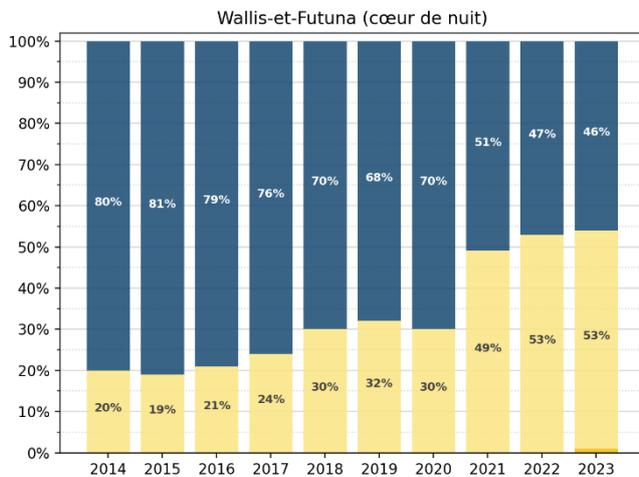
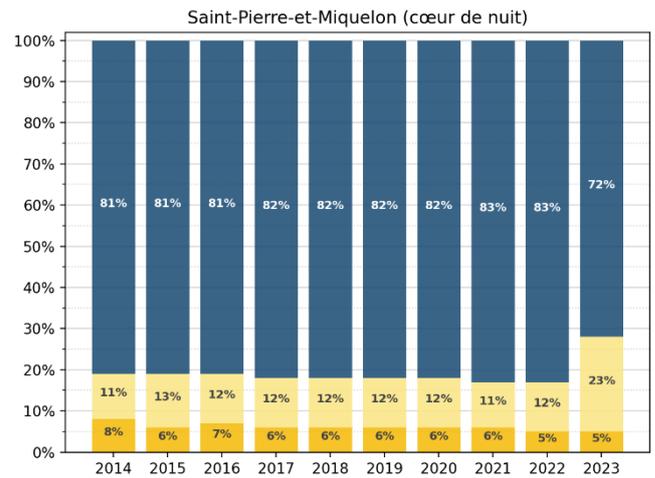
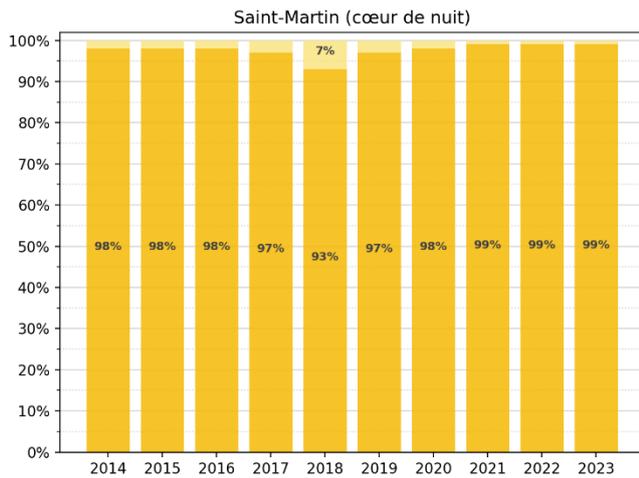
Guadeloupe (cœur de nuit)



Guyane (cœur de nuit)

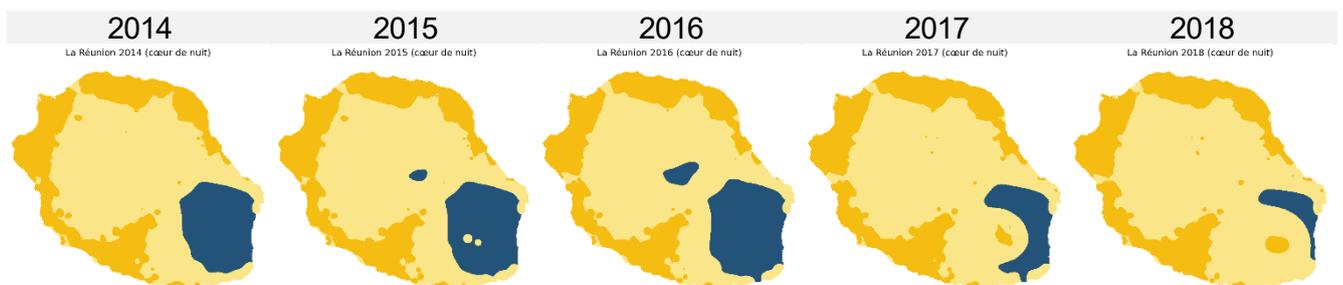


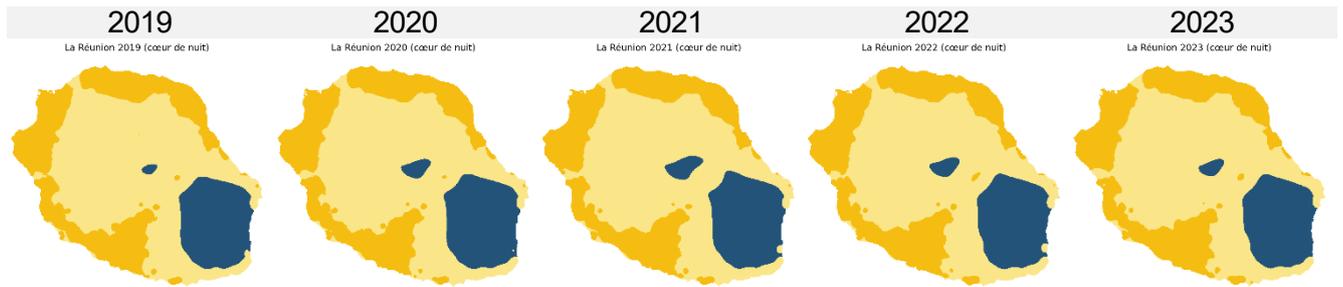




Pour 3 territoires ultramarins, on note une dégradation de la qualité de ciel au fil des années avec des augmentations significatives de la classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse) : Mayotte, Saint-Barthélemy, Wallis-et-Futuna. Pour la Guadeloupe et la Martinique, on relève une décroissance de cette classe, bien que pour la Guadeloupe la situation se soit stabilisée en 2023.

La Réunion est un cas très particulier puisque la décroissance observée de la classe 3 (territoire peu impacté par la pollution lumineuse) en 2017 et 2018 est en fait liée à une cause naturelle, l'éruption du Piton de la Fournaise. Si l'on fait abstraction de ce phénomène naturel, les ratios des différentes classes sont relativement stables sur ce territoire. Les 10 vignettes ci-dessous montrent les cartes de classes de La Réunion entre 2014 et 2023. On y voit parfaitement bien la modification de la classe 3 provoquée par l'éruption du volcan.



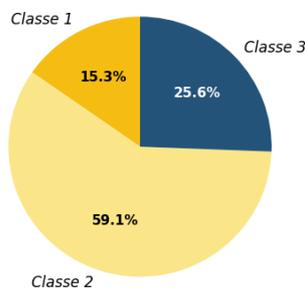


Une petite éruption est aussi visible sur le flanc sud-ouest du volcan en 2015. Il est à noter que pour être détectables dans données annuelles de radiance satellite VIIRS-DNB, il est nécessaire que les éruptions durent une partie significative de l'année afin que la radiance associée à ce phénomène subsiste dans le processus de création des composites annuels (qui est réalisé par moyennage des composites mensuels).

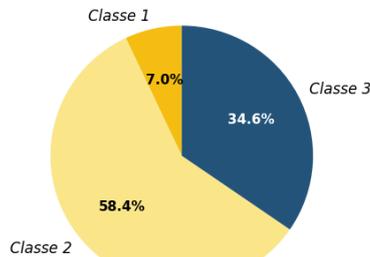
3.3 Régions

Le tableau suivant montre les indicateurs de **cœur de nuit 2023** calculés pour chacune des 13 régions de France Métropolitaine. A la suite du tableau, un récapitulatif des indicateurs de toutes les régions pour l'année 2023 est fourni. Cela permet de comparer aisément les situations pour les différentes régions. On remarque bien sûr une forte hétérogénéité des situations entre les différentes régions. La Corse et la Nouvelle-Aquitaine sont les deux régions qui ont la classe 3 (territoire peu impacté par la pollution lumineuse) la plus importante alors que l'Île-de-France et les Hauts-de-France ont la classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse) les plus importante.

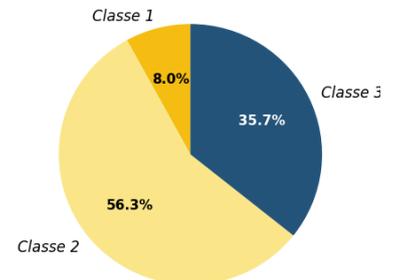
Auvergne-Rhône-Alpes 2023 (cœur de nuit)



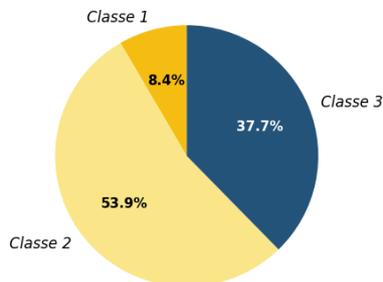
Bourgogne-Franche-Comté 2023 (cœur de nuit)



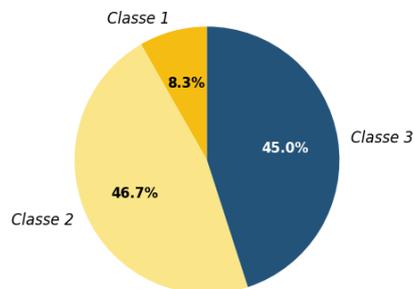
Bretagne 2023 (cœur de nuit)



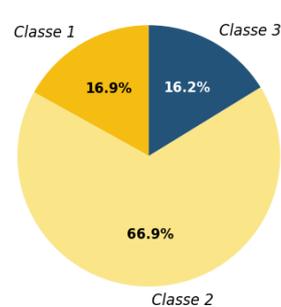
Centre-Val de Loire 2023 (cœur de nuit)



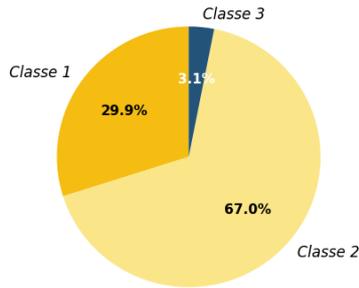
Corse 2023 (cœur de nuit)



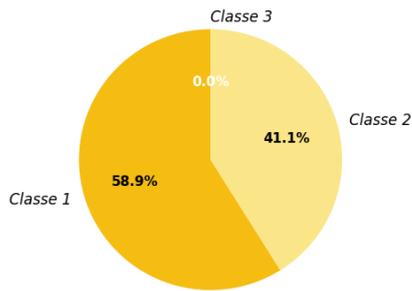
Grand Est 2023 (cœur de nuit)



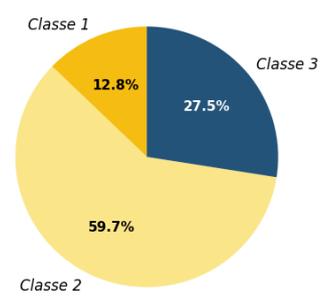
Hauts-de-France 2023 (cœur de nuit)



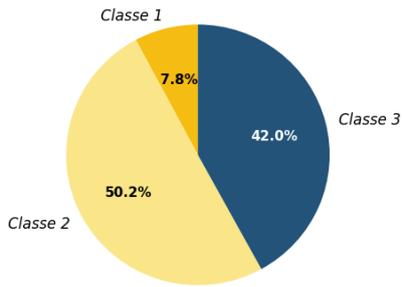
Île-de-France 2023 (cœur de nuit)



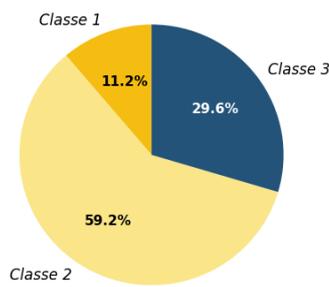
Normandie 2023 (cœur de nuit)



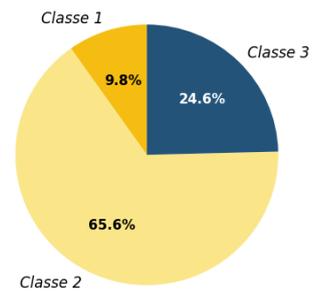
Nouvelle-Aquitaine 2023 (cœur de nuit)



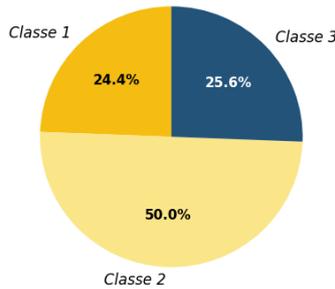
Occitanie 2023 (cœur de nuit)



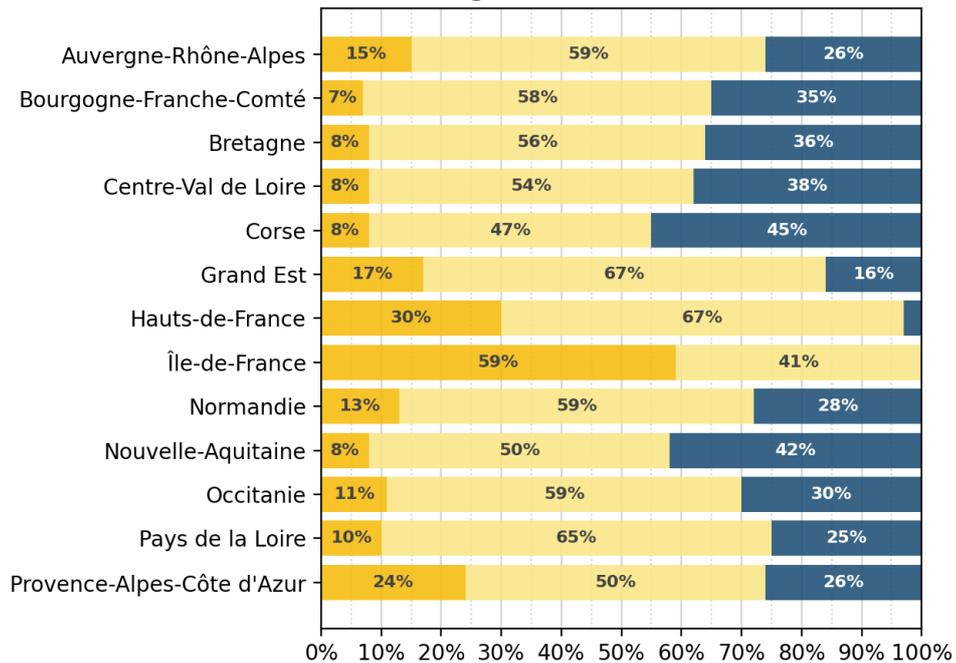
Pays de la Loire 2023 (cœur de nuit)



Provence-Alpes-Côte d'Azur 2023 (cœur de nuit)

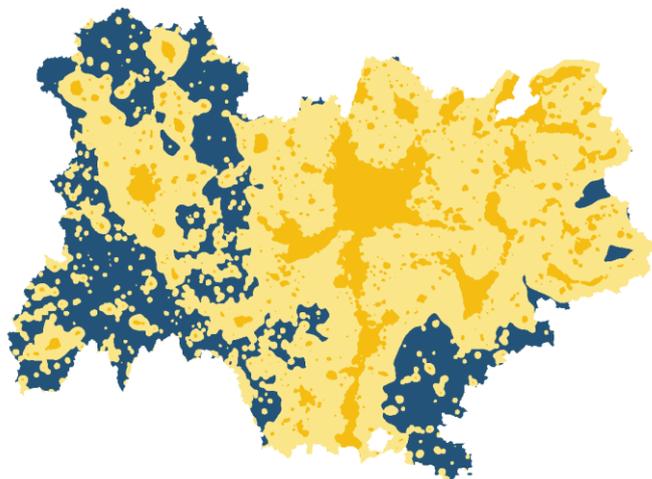


Régions 2023 (cœur de nuit)

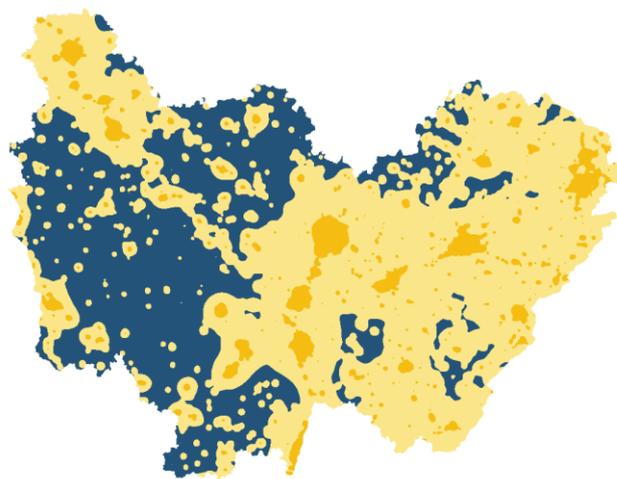


Les 13 cartes des régions françaises sont montrées ci-dessous pour l'année 2023 avec les différentes classes de cœur de nuit représentées sur tout le territoire en utilisant leur couleur normalisée (classe 1 en orange, classe 2 en jaune et classe 3 en bleu).

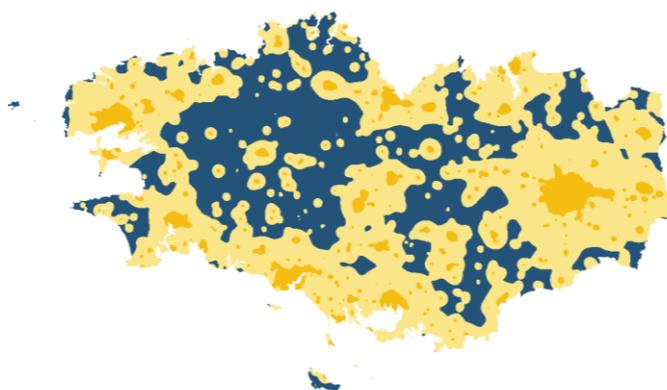
Auvergne-Rhône-Alpes 2023 (cœur de nuit)



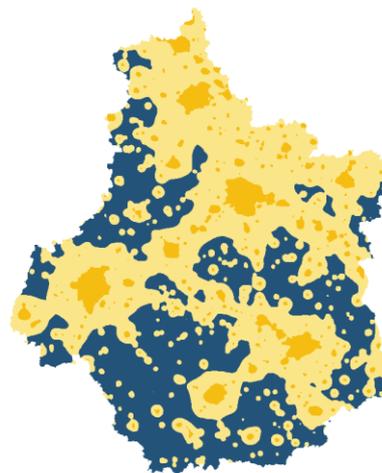
Bourgogne-Franche-Comté 2023 (cœur de nuit)



Bretagne 2023 (cœur de nuit)



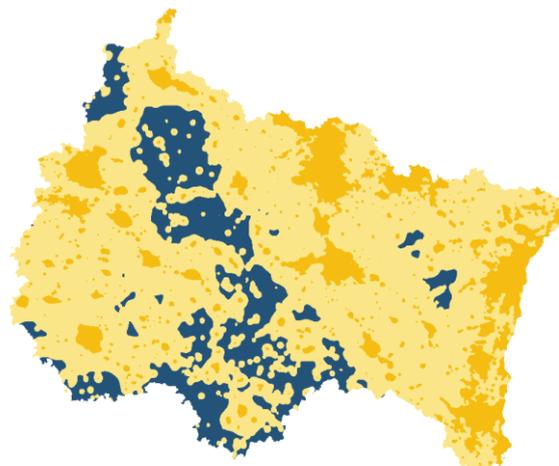
Centre-Val de Loire 2023 (cœur de nuit)



Corse 2023 (cœur de nuit)



Grand Est 2023 (cœur de nuit)



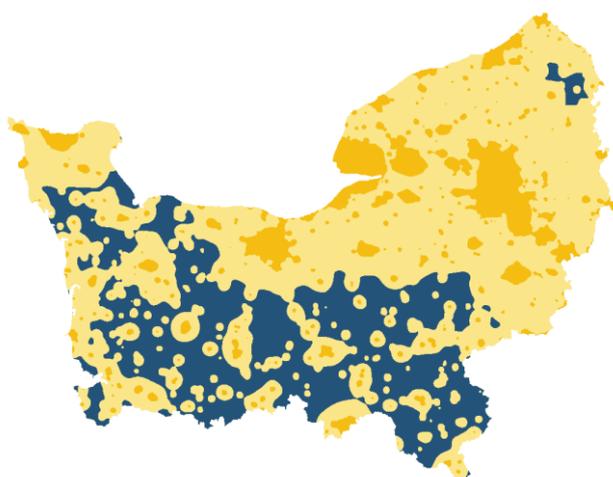
Hauts-de-France 2023 (cœur de nuit)



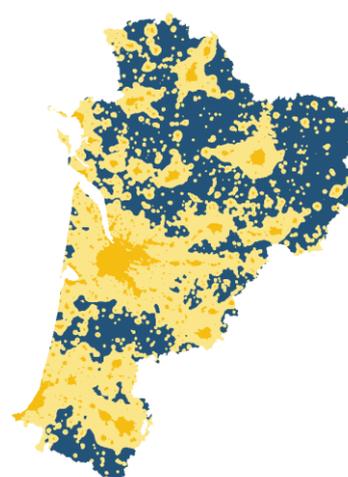
Île-de-France 2023 (cœur de nuit)



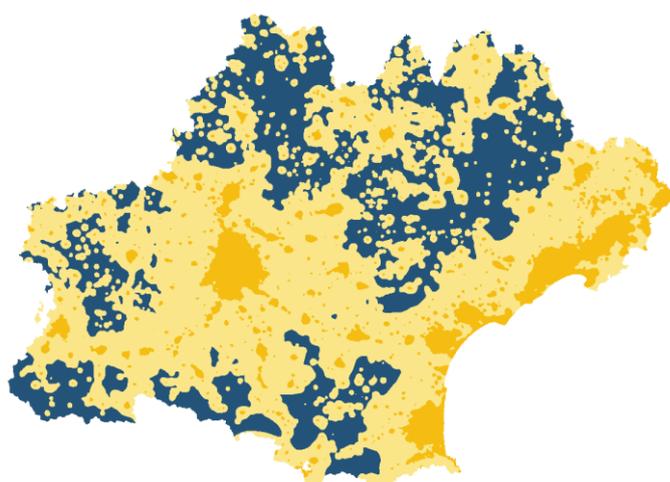
Normandie 2023 (cœur de nuit)



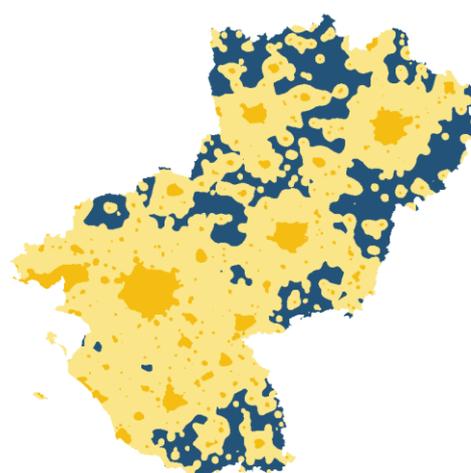
Nouvelle-Aquitaine 2023 (cœur de nuit)



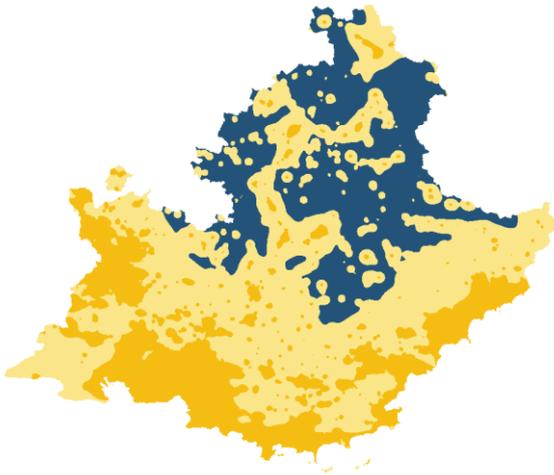
Occitanie 2023 (cœur de nuit)



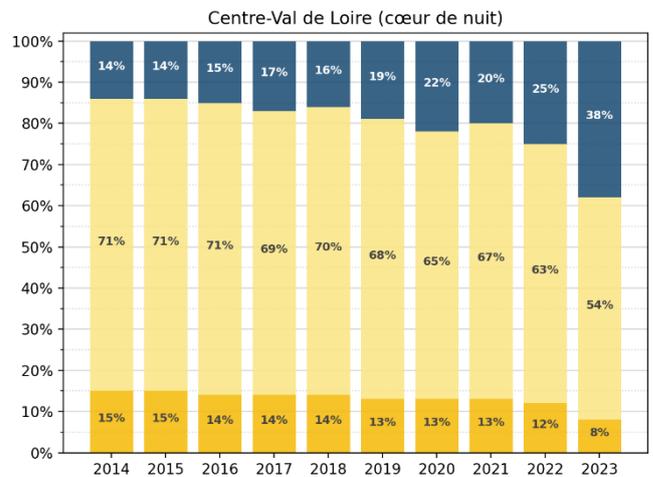
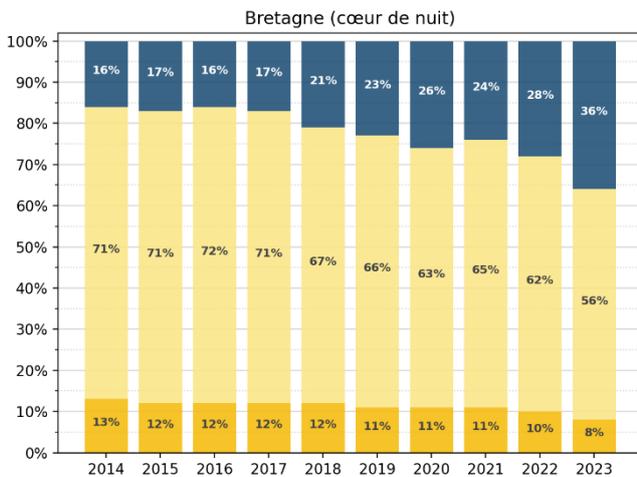
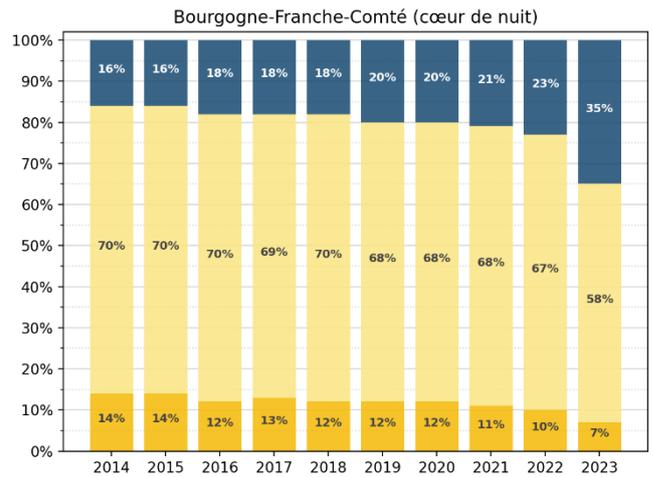
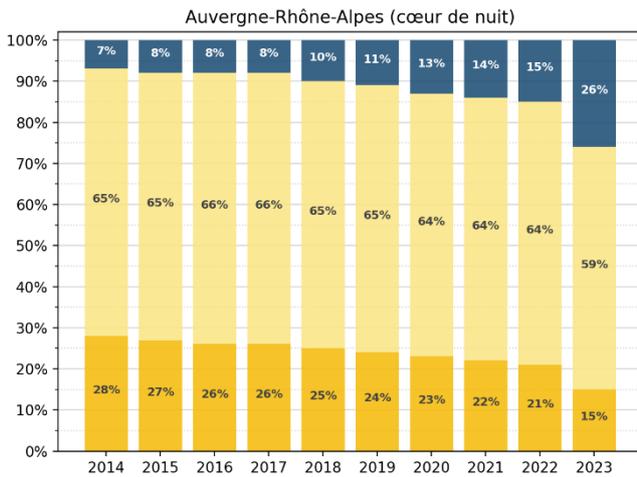
Pays de la Loire 2023 (cœur de nuit)

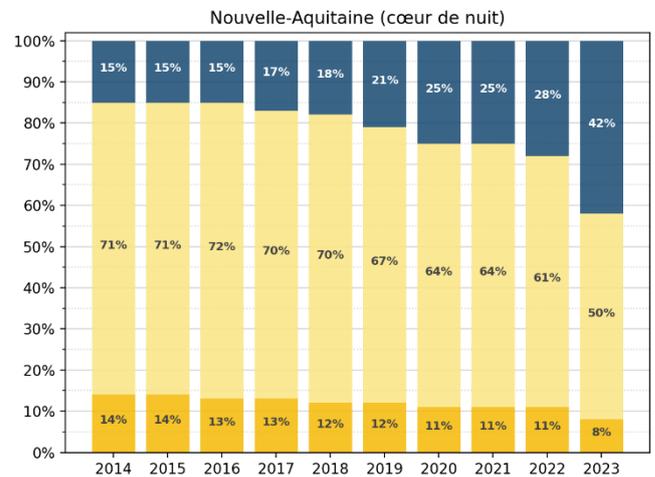
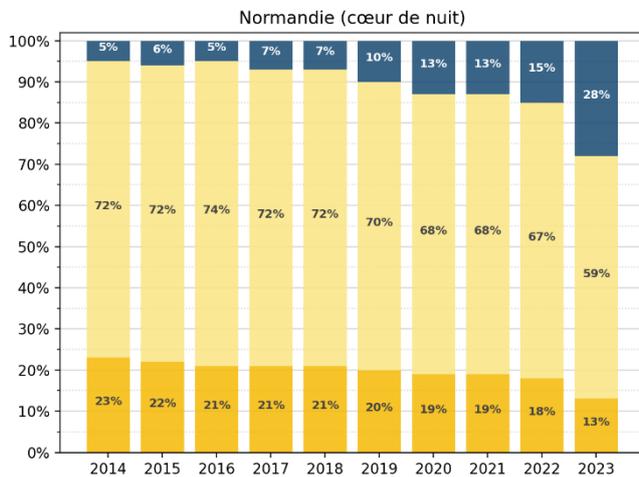
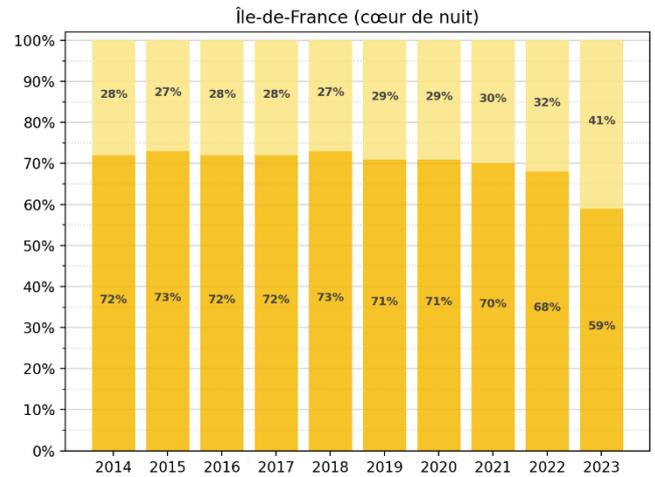
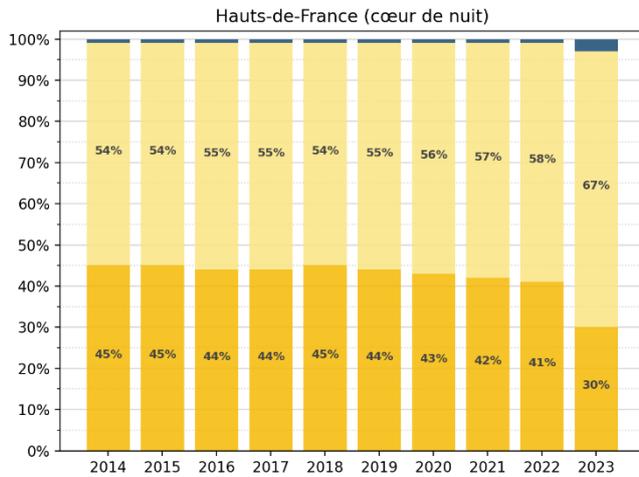
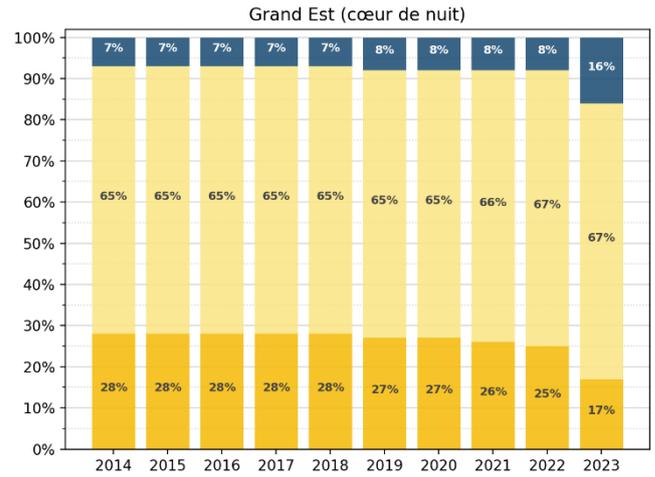
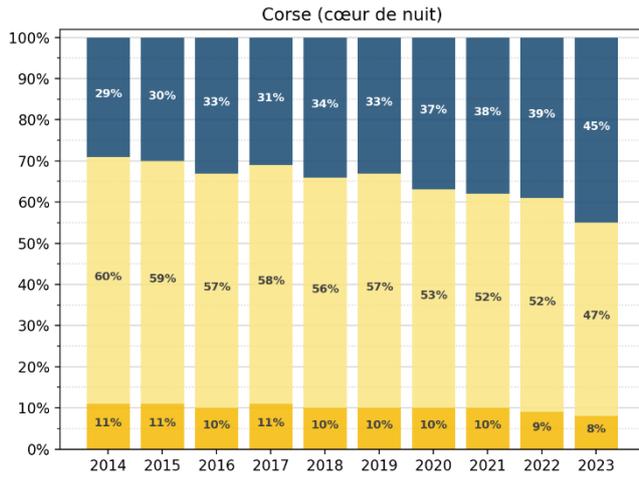


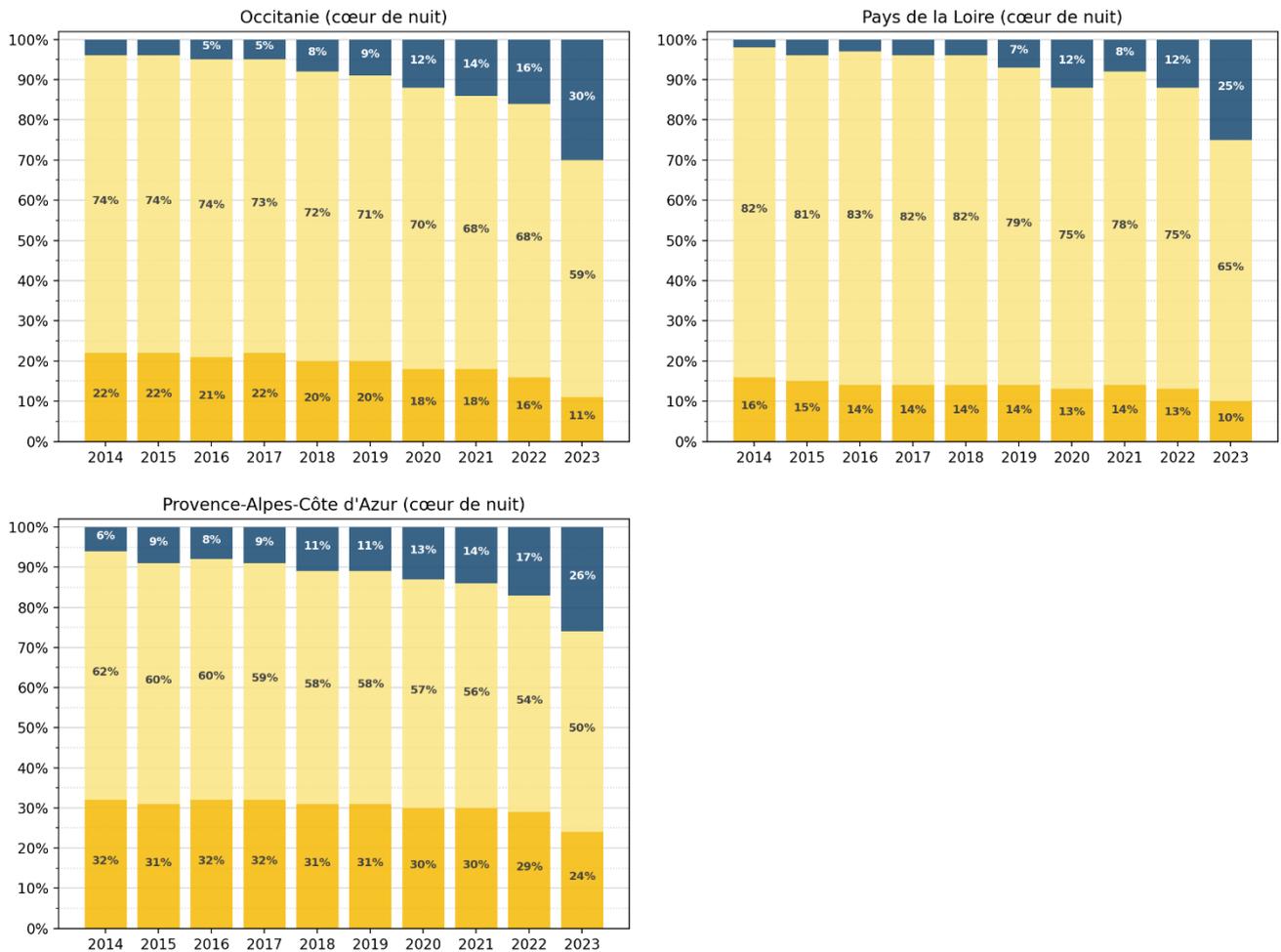
Provence-Alpes-Côte d'Azur 2023 (cœur de nuit)



Il est intéressant de visualiser l'évolution des classes sur les différentes régions au fil des années. Le tableau ci-dessous montre les 13 diagrammes d'évolution entre 2014 et 2023 pour la situation de cœur de nuit. Pour la plupart des régions on remarque une évolution progressive de l'importance de la classe 3 (territoire peu impacté par la pollution lumineuse) avec une accélération en 2023. La corse part d'une situation plus favorable en 2014 et elle n'a pas connue une franche accélération en 2023.



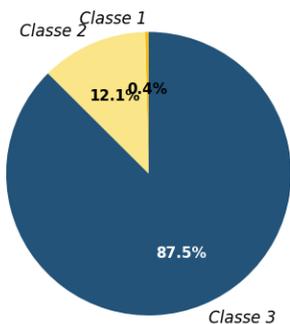




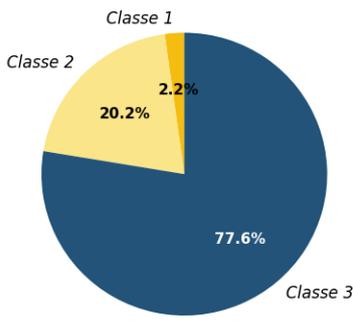
3.4 Départements

Les indicateurs de cœur de nuit en 2023 pour les départements de la Creuse, de la Nièvre, de l'Orne, des Alpes-Maritimes, du Pas-de-Calais et des Bouches-du-Rhône sont montrés ci-dessous. Ces départements ont été choisis à titre d'exemple pour leurs situations contrastées en termes de ratio de classes. La Creuse possède très peu de centres urbains denses et la classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse) est quasiment inexistante (0,4%). A l'opposé, le département des Bouches-du-Rhône ne possède aucune partie de son territoire en classe 3 (territoire peu impacté par la pollution lumineuse). Le Pas-de-Calais est lui aussi fortement impacté par la pollution lumineuse alors que les Alpes-Maritimes possèdent un indicateur plus équilibré du fait de la présence au nord du département de zones de montagnes plus sombres que le littoral. La Nièvre et l'Orne sont des départements avec une pratique importante de l'extinction en cœur de nuit et ils possèdent tous deux un ratio de classe 3 important.

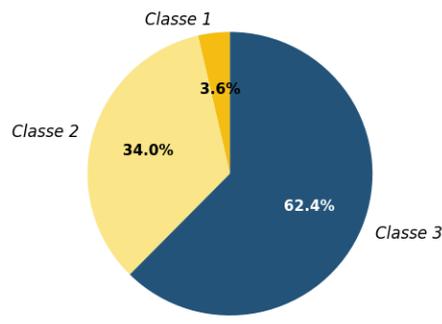
Creuse 2023 (cœur de nuit)



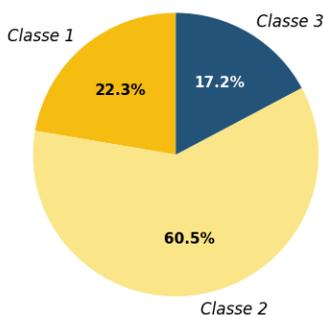
Nièvre 2023 (cœur de nuit)



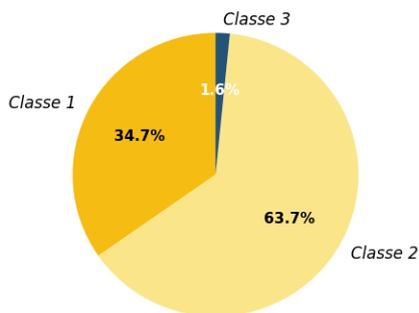
Orne 2023 (cœur de nuit)



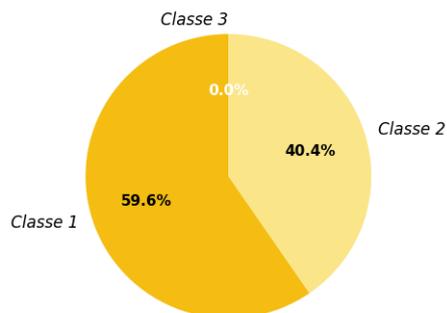
Alpes-Maritimes 2023 (cœur de nuit)



Pas-de-Calais 2023 (cœur de nuit)

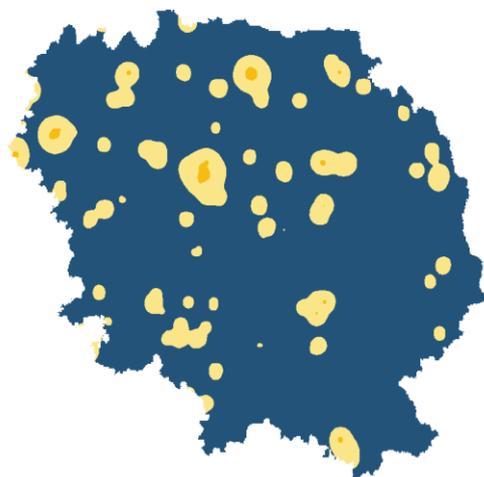


Bouches-du-Rhône 2023 (cœur de nuit)

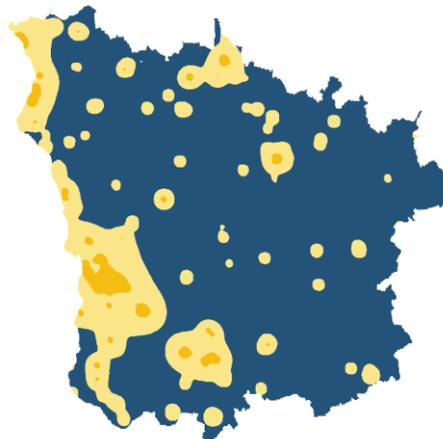


Le tableau ci-dessous montre les cartes de classes pour l'année 2023 en cœur de nuit des 6 territoires utilisés à titre d'exemple.

Creuse 2023 (cœur de nuit)



Nièvre 2023 (cœur de nuit)



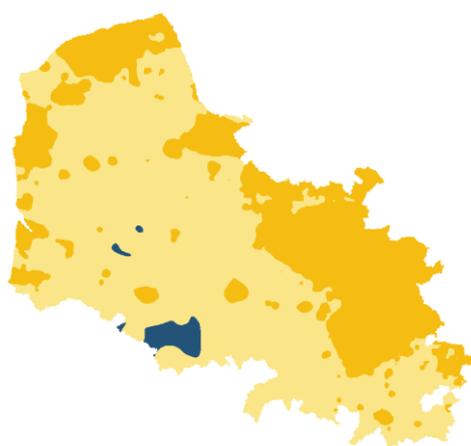
Orne 2023 (cœur de nuit)



Alpes-Maritimes 2023 (cœur de nuit)



Pas-de-Calais 2023 (cœur de nuit)

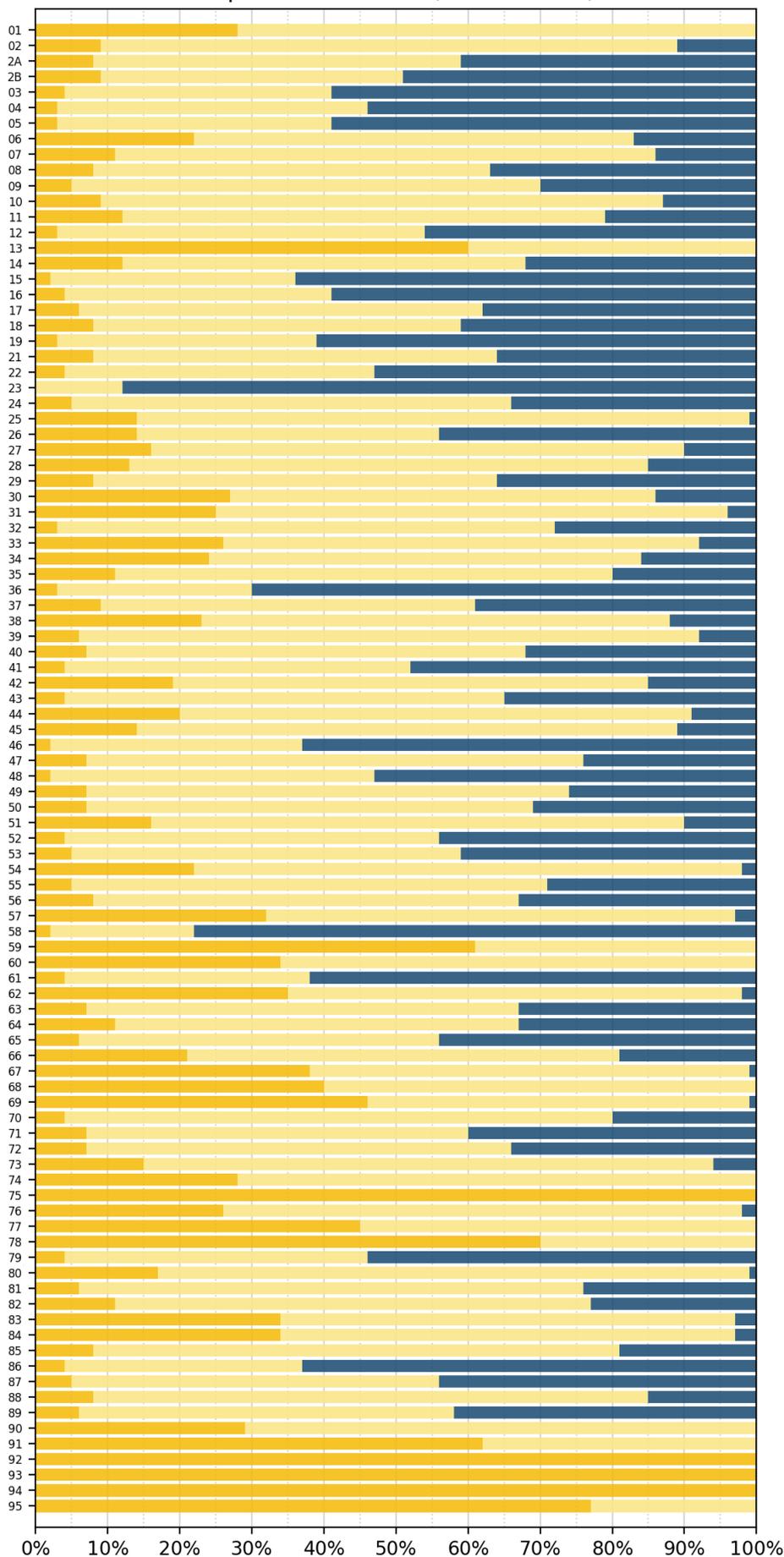


Bouches-du-Rhône 2023 (cœur de nuit)



Sur la page suivante, un diagramme récapitule les ratios 2023 de tous les départements pour une situation de cœur de nuit. On remarquera la très grande inhomogénéité des profils de classe entre les différents départements.

Départements 2023 (cœur de nuit)



Les indicateurs, les cartes et les diagrammes récapitulatifs de tous les départements sont fournis dans l'annexe B de ce rapport.

4 Indicateurs 3 classes d'extrémités de nuit

Cette nouvelle version du rapport « *Mise à jour et extension de l'indicateur national de suivi de la pollution lumineuse* » intègre une méthodologie différente pour le calcul de l'indicateur d'extrémités de nuit par rapport aux deux premières versions. Elle s'appuie sur un mécanisme original de détection des chutes de radiance mensuelle développé conjointement avec le CEREMA.

La pratique de l'extinction de l'éclairage public en cœur de nuit est désormais très répandue en France. Avant la crise sanitaire de 2020, on estimait que plus d'un tiers des communes pratiquaient l'extinction totale de leur parc d'éclairage public (principalement des communes de petite taille). La crise sanitaire de 2020 a permis à la population et aux élus de mieux intégrer l'idée qu'éclairer des espaces publics inutilisés n'avait souvent pas grand sens et la forte croissance des coûts de l'énergie en 2022 a fini de convaincre de nombreux élus qu'il fallait mettre en place des politiques d'extinction ou de gradation de puissance des parcs d'éclairage public, y compris dans des communes de taille importante. Par rapport à la situation qui prévalait avant 2020, on se retrouve donc en 2024 dans une situation où un nombre encore plus important de communes a mis en place des politiques d'extinction ou de gradation de puissance.

Comme on l'a vu dans la section 2.1, les données de radiance satellite sont collectées en situation de cœur de nuit (le satellite étant toujours à l'opposé du Soleil). Or, il est avéré que les principaux enjeux en termes d'impact sur la biodiversité sont plutôt situés en extrémités de nuit (aube et crépuscule) au moment où de nombreuses espèces sont les plus actives⁹. Il apparaît donc fondamental de prendre en compte ces extinctions dans un **indicateur de pollution lumineuse d'extrémités de nuit**.

4.1 Méthodologie pour l'indicateur d'extrémités de nuit

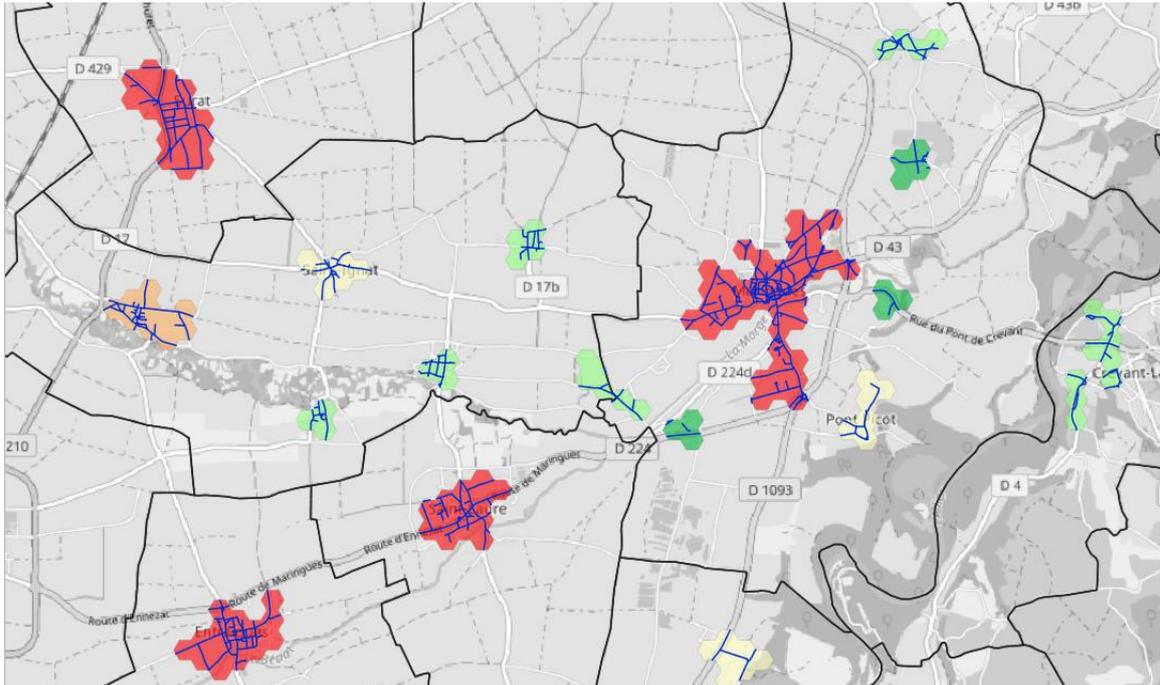
L'approche mise en œuvre pour produire cet indicateur d'extrémités de nuit est très similaire à celle utilisée pour l'indicateur de cœur de nuit exposée dans la section 2. La seule différence concerne les données de radiance satellite qui sont utilisées en entrée du processus de calcul des indicateurs. Au lieu d'utiliser un jeu de radiance annuel VNL V2 comme on le fait pour la situation de cœur de nuit, on va utiliser un jeu de radiance modifié dans lequel on aura injecté de la radiance supplémentaire sur les zones pour lesquelles une extinction ou une diminution de puissance aura été détectée. Pour réaliser cet objectif, DarkSkyLab a mis au point une méthode consistant à produire un raster de radiance qui simule ce que verrait un satellite qui passerait non pas en cœur de nuit mais en début de nuit avant que les extinctions soient en place. Une fois ce raster produit, la production de l'indicateur d'extrémités de nuit suit exactement le même processus que celui qui est utilisé pour la production de l'indicateur de cœur de nuit (voir la section 2). Pour produire le raster modifié d'extrémités de nuit, la méthodologie utilisée est la suivante :

- On détermine pour toutes les communes françaises les contours des continuités de bâti puisque ce sont sur ces zones que l'on s'attend à trouver des émissions de lumière et donc de la radiance. On utilise pour cela la notion d'**IRIS** proposé par l'IGN¹⁰. Les IRIS représentent des entités administratives homogènes (par exemple une zone résidentielle) généralement de plus

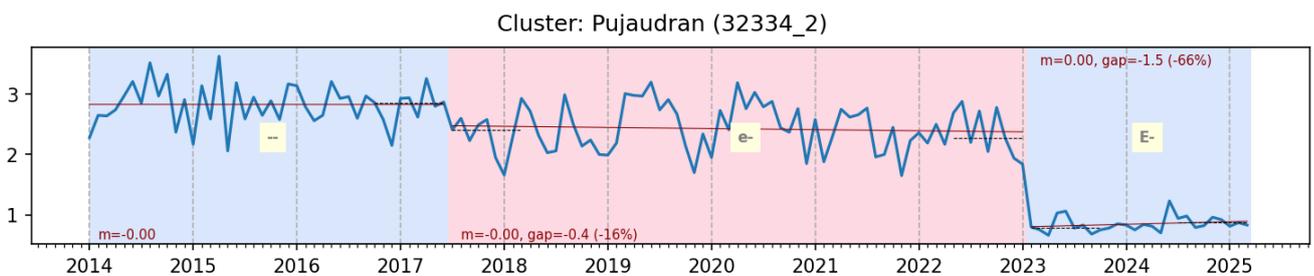
⁹ Voir par exemple « Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? »

¹⁰ Voir <https://geoservices.ign.fr/contoursiris>

petite taille que les communes elles-mêmes. Chaque IRIS possède un type qui peut être *habitat*, *activité* ou *divers*. Les IRIS sont ensuite croisés avec le **BD TOPO** de l'IGN pour connaître dans chacun des IRIS le nombre d'habitations, de logements, d'industries et de commerces ainsi que des caractéristiques spécifiques comme la longueur des voies de l'IRIS. Les zones résultantes, appelées **clusters**, sont finalement filtrées et on ne retient que celles qui possèdent un nombre minimum de logements, de bâtiments commerciaux ou de bâtiments industriels. La France Métropolitaine comporte 175.824 clusters indépendants (pour l'année 2024) pour 34.957 communes, soit une moyenne de 5 clusters par communes. A titre d'exemple, la carte ci-dessous montre quelques clusters avec en superposition l'infrastructure des voies de circulation. Les limites de communes sont représentées avec un trait plein noir.



- Pour chacun des clusters France Métropolitaine, on calcule l'historique de la moyenne de radiance de cœur de nuit mois par mois depuis janvier 2014. Une fois cet historique obtenu, on applique un algorithme qui va analyser les variations de radiance moyenne sur le cluster et déterminer si une extinction a été mis en place à un moment donné et s'est maintenue ensuite jusqu'au dernier mois de radiance de l'année pour laquelle on souhaite obtenir le raster de radiance d'extrémités de nuit. A titre d'exemple, le schéma suivant montre un historique de radiance et une extinction bien visible qui est survenue tout début 2023 sur un cluster de la commune de Pujaudran. Cette extinction s'est maintenue jusqu'à la fin de l'année 2023.



- Pour les clusters sur lesquels une extinction a été détectée, on calcule un budget de radiance à répartir sur ce cluster pour amener sa moyenne à 90% de la valeur de radiance moyenne observée avant extinction. Cela permet alors de recréer des niveaux de radiance qui

préexistaient à l'extinction mise en place. On ne cherche pas à réintroduire 100% de la différence de radiance avant et après extinction pour ne pas surestimer la correction et pour prendre en compte d'éventuelles améliorations des parcs d'éclairage.

- Pour les clusters sur lesquels aucune extinction n'a été observée depuis 2014, on analyse les émissions de radiance de ces clusters par rapport à l'**infrastructure** qu'ils contiennent. On évalue les corrélations qui peuvent exister entre l'infrastructure présente dans les clusters (habitations, logements, densité de voie, surface des bâtiments industriels et commerciaux, etc.) et leur radiance moyenne mesurée. L'utilisation d'un algorithme de *machine learning* permet de réaliser cette corrélation puis de prédire quelle radiance est attendue pour chaque cluster en fonction de l'infrastructure présente. Cette fonctionnalité permet donc de comparer les clusters entre eux en termes de radiance émise pour une infrastructure équivalente, ceci à l'échelle de la France Métropolitaine. Les clusters ayant au moins 200 logements et avec une radiance mesurée de moins de 2 nW qui sont détectés par l'heuristique comme étant sous-éclairés par rapport à leur infrastructure sont alors traités comme les clusters pour lesquels une extinction a été détectée. Ces clusters sont considérés comme ayant été éteints avant 2014 (des extinctions progressives ou des diminutions de puissance peuvent aussi avoir été réalisées au fil du temps et ne pas être détectés par l'heuristique) et un budget de radiance est ajouté sur ces clusters pour recréer une situation d'extrémités de nuit sans extinction.

On se trouve à l'issue de ce processus avec un raster de radiance corrigé qui représente une situation d'extrémités de nuit et qui peut être utilisé pour calculer une nouvelle version de l'indicateur. Ce raster représente donc une sorte de photographie moyenne annuelle de la radiance qui serait vue par un hypothétique satellite qui passerait par exemple en tout début de nuit avant que les extinctions pratiquées par les communes soient mises en place. Il est à noter que la méthodologie décrite ici ne réinjecte pas de radiance qui serait inférieure au seuil de détection de l'instrument VIIRS-DNB embarqué par les satellites. Ce n'était pas le cas pour la méthode décrite dans la version précédente de ce rapport, méthode qui permettait l'injection d'un grand nombre de petites sources de radiance qui n'auraient pas pu être détectées par le satellite, ce qui avait pour effet de fortement réduire la proportion de la classe la plus sombre de l'indicateur.

Du fait de la nouvelle méthodologie utilisée (qui revient à simuler un passage en début de nuit d'un satellite de mesure de la radiance sans modifier son seuil de détection), les proportions des 3 classes de l'indicateur d'extrémités de nuit sont significativement différentes de celles publiées dans la version précédente du rapport. Cette nouvelle approche nous semble plus cohérente car elle permet de comparer une situation mesurée (le cœur de nuit) à une situation simulée (l'extrémité de nuit) qui utilise les mêmes hypothèses de sensibilité de l'instrument de mesure.

La carte de la figure 14 ci-dessous montre en rouge les clusters qui ne sont pas concernés par une forme d'extinction ou de diminution de puissance et en bleu ceux qui le sont et pour lesquels de la radiance va être réinjectée dans le raster d'extrémités de nuit. Les petits clusters avec une radiance inférieure à 0,5 nW apparaissent en rouge sur la facture (aucune radiance n'est réinjectée pour ces derniers dans le raster d'extrémités de nuit).

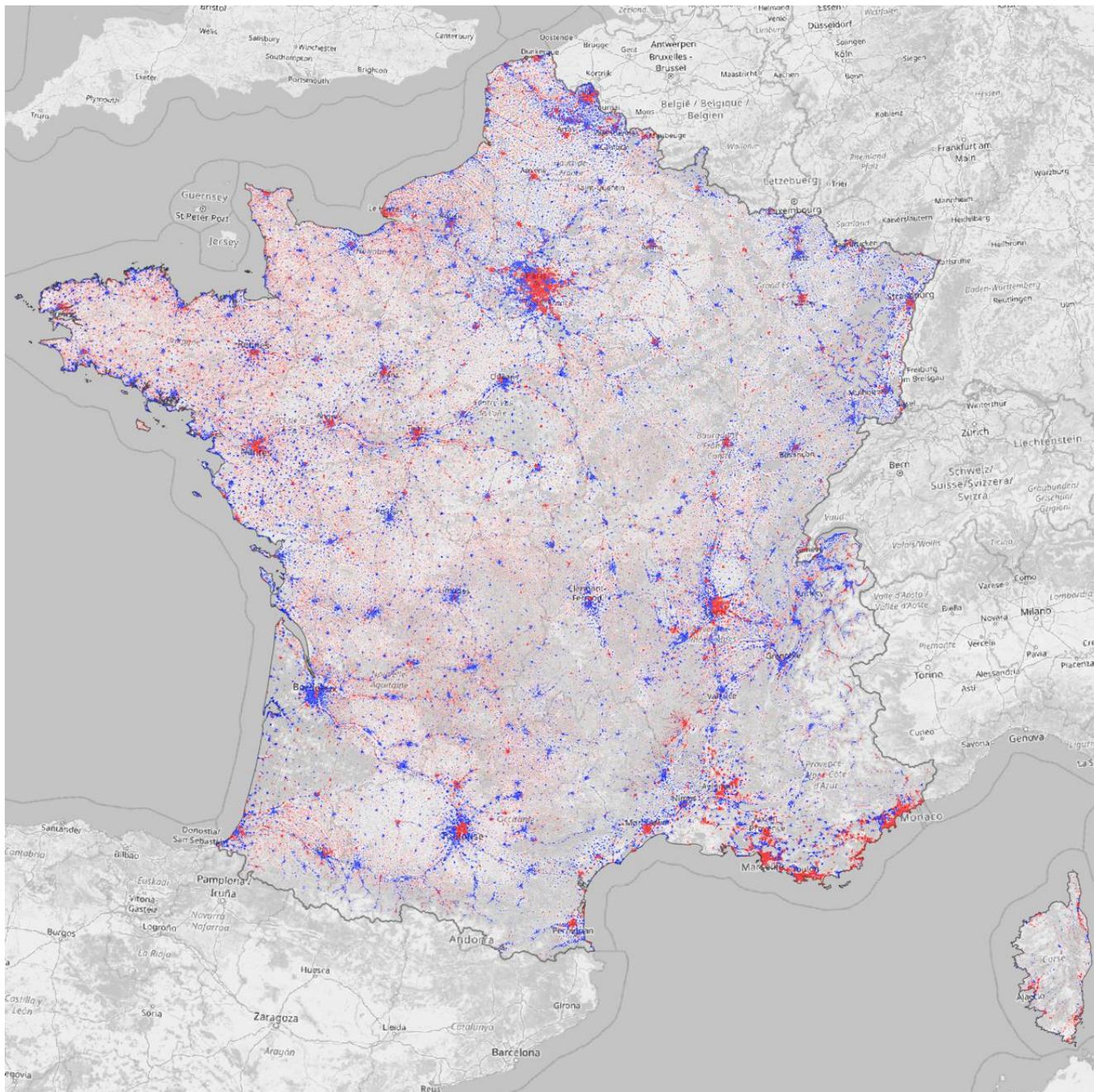
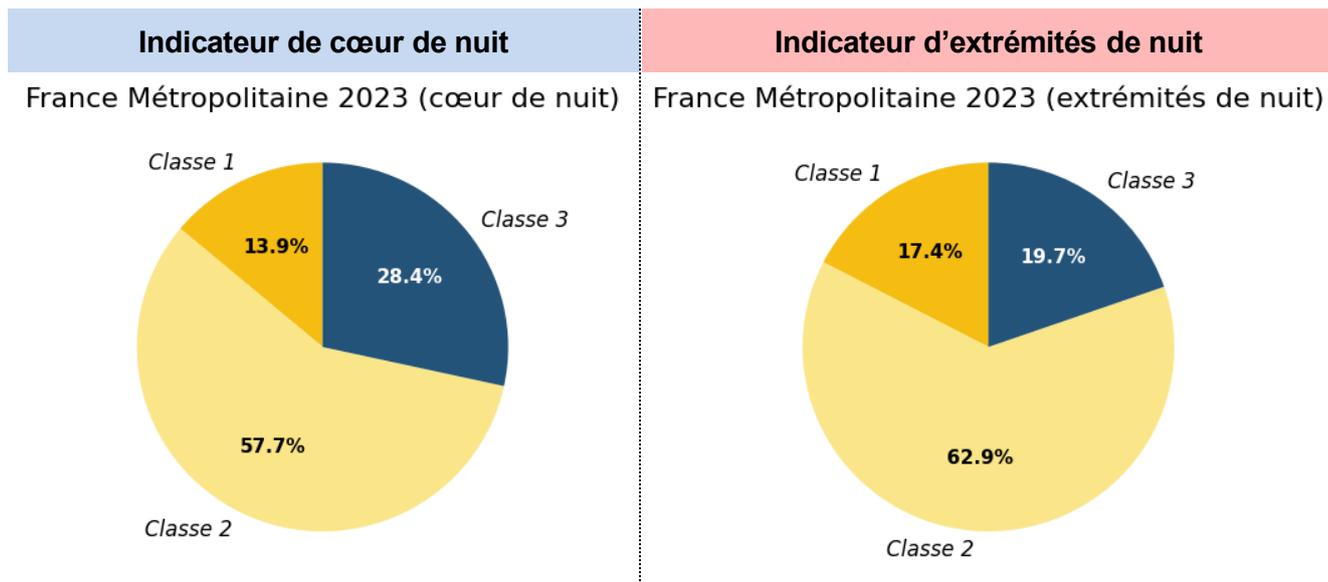


Figure 14 – Statut des clusters vis-à-vis de l’extinction (en bleu ceux avec une forte probabilité d’extinction, en rouge sinon)

Le calcul de l’indicateur d’extrémités de nuit a été réalisé uniquement pour l’année 2023 sur la France Métropolitaine et les 13 régions, ce qui représente un total de 14 indicateurs qui sont présentés dans les deux sous-sections suivantes.

4.2 France Métropolitaine

L’indicateur 2023 d’extrémités de nuit pour la France Métropolitaine est fourni ci-dessous. Il est mis en comparaison avec l’indicateur de cœur de nuit de manière à bien visualiser les différences entre les deux situations.



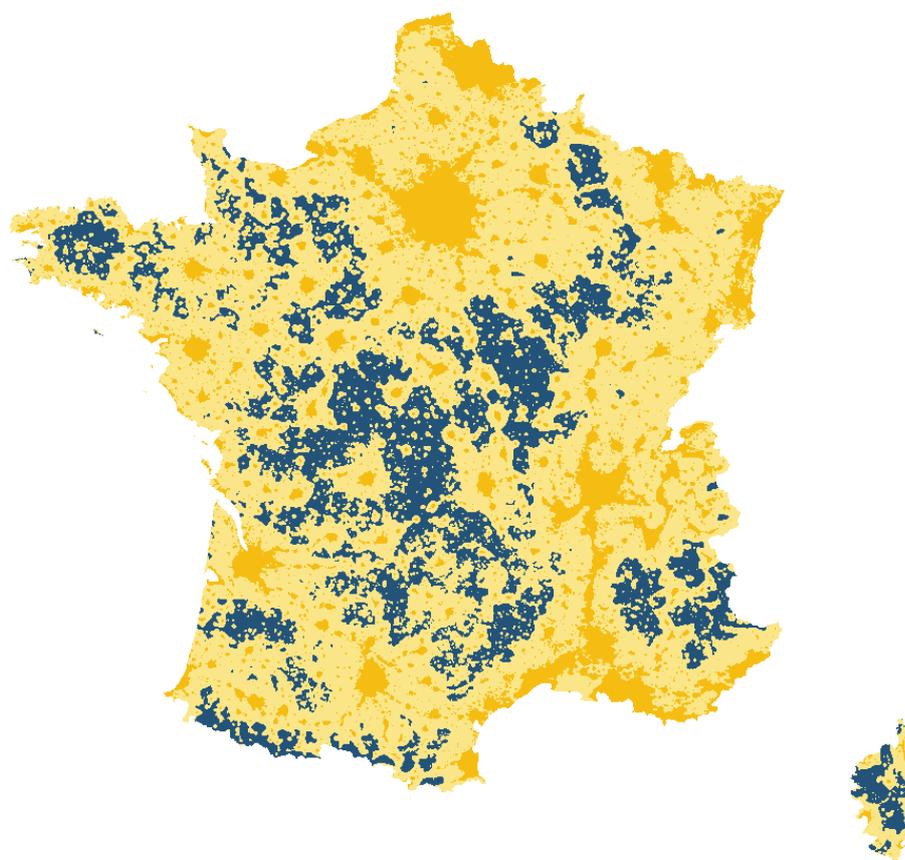
On peut constater une différence significative des ratios des différentes classes entre les deux situations de cœur de nuit et d'extrémités de nuit. La classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse) passe de 13,9% à 17,4%, ce qui indique que dans les cœurs de ville moyennes et importantes les niveaux de pollution lumineuse sont un peu plus élevés en extrémités de nuit. C'est d'ailleurs un pattern classique qui est observé dans les mesures en continu de la pollution lumineuse : on observe un profil d'assombrissement marqué avec parfois des sautes brusques liés à d'éventuelles extinctions à courte et moyenne distance.

La classe 3 (territoire peu ou pas impacté par la pollution lumineuse) régresse quant à elle fortement et passe de 28,4% à 19,7%. Cela est dû non seulement au fait que les villes importantes et moyennes injectent plus de lumière dans l'environnement nocturne mais aussi et surtout au fait que des communes de plus petite taille ont leur éclairage public allumé, provoquant un « mitage » des zones qui apparaissent comme entièrement sombres en cœur de nuit.

L'évolution entre les deux indicateurs montre bien qu'il est primordial pour un pays comme la France (où l'extinction en cœur de nuit est une pratique courante contrairement à la plupart des autres pays dans le monde) de bien différencier les deux indicateurs de cœur de nuit et d'extrémités de nuit.

La carte ci-dessous montre les différentes classes d'extrémités de nuit 2023 représentées sur tout le territoire de France Métropolitaine en utilisant leur couleur normalisée (classe 1 en orange, classe 2 en jaune et classe 3 en bleu).

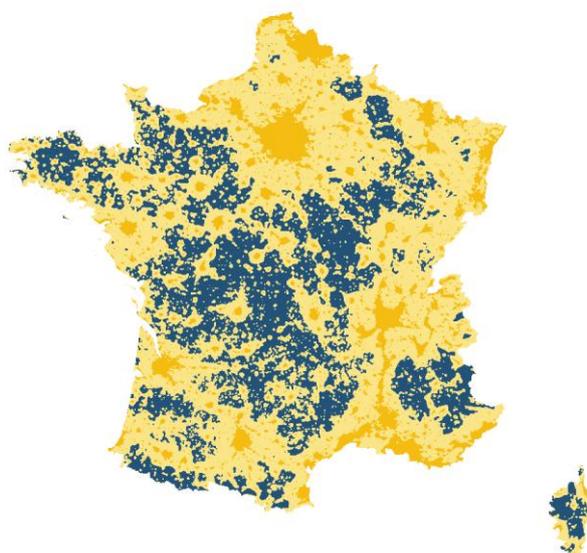
France Métropolitaine 2023 (extrémités de nuit)



A titre de comparaison, les deux cartes de cœur de nuit et d'extrémités de nuit sont positionnées côte-à-côte ci-dessous :

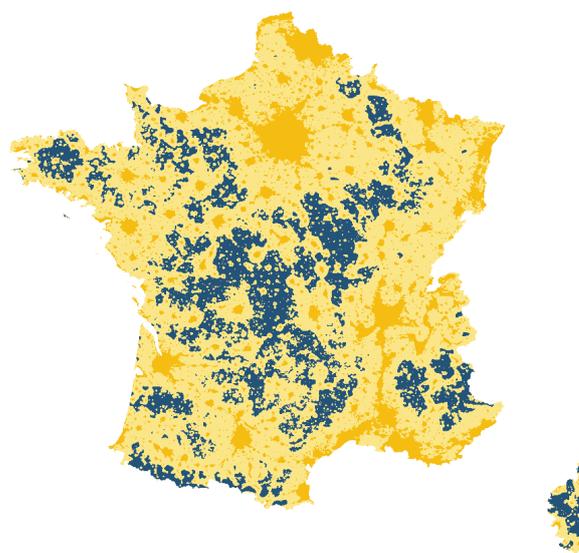
Cœur de nuit

France Métropolitaine 2023 (cœur de nuit)



Extrémités de nuit

France Métropolitaine 2023 (extrémités de nuit)

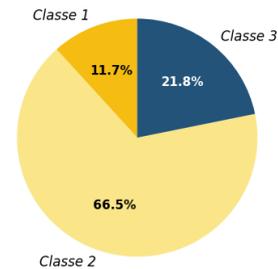
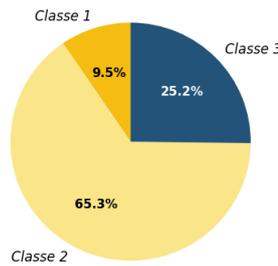
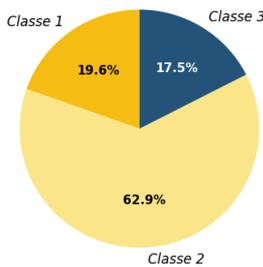


On visualise facilement sur la carte d'extrémités de nuit les zones peu habitées où la classe 3 (territoire peu ou pas impacté par la pollution lumineuse) reste prévalente mais en fort recul par rapport à la situation de cœur de nuit.

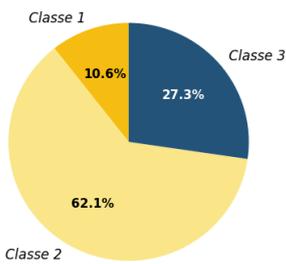
4.3 Régions

Le tableau suivant montre les indicateurs **d'extrémités de nuit 2023** calculés pour chacune des 13 régions de France Métropolitaine. A la suite du tableau, un récapitulatif des indicateurs de toutes les régions pour l'année 2023 est fourni. Cela permet de comparer aisément les situations pour les différentes régions.

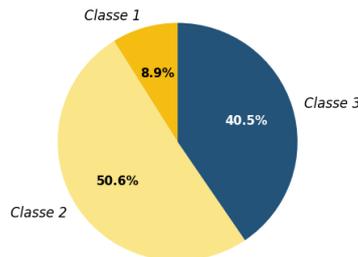
Auvergne-Rhône-Alpes 2023 (extrémités de nuit) Bourgogne-Franche-Comté 2023 (extrémités de nuit) Bretagne 2023 (extrémités de nuit)



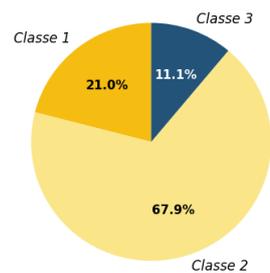
Centre-Val de Loire 2023 (extrémités de nuit)



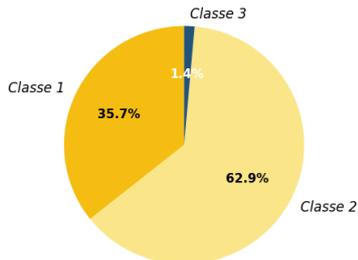
Corse 2023 (extrémités de nuit)



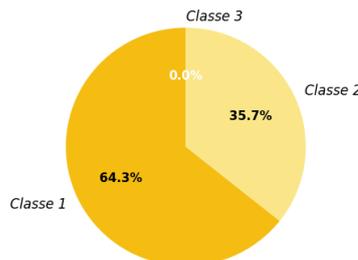
Grand Est 2023 (extrémités de nuit)



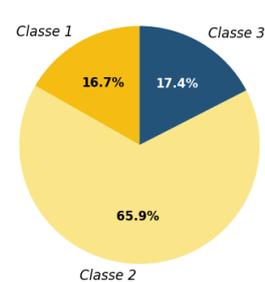
Hauts-de-France 2023 (extrémités de nuit)



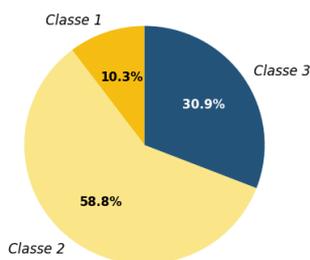
Île-de-France 2023 (extrémités de nuit)



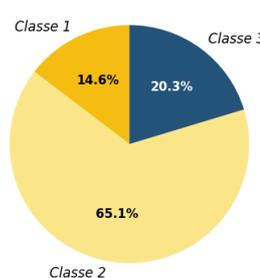
Normandie 2023 (extrémités de nuit)



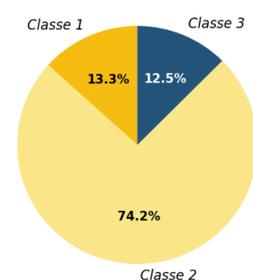
Nouvelle-Aquitaine 2023 (extrémités de nuit)



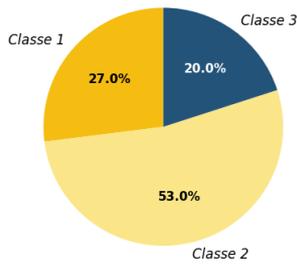
Occitanie 2023 (extrémités de nuit)



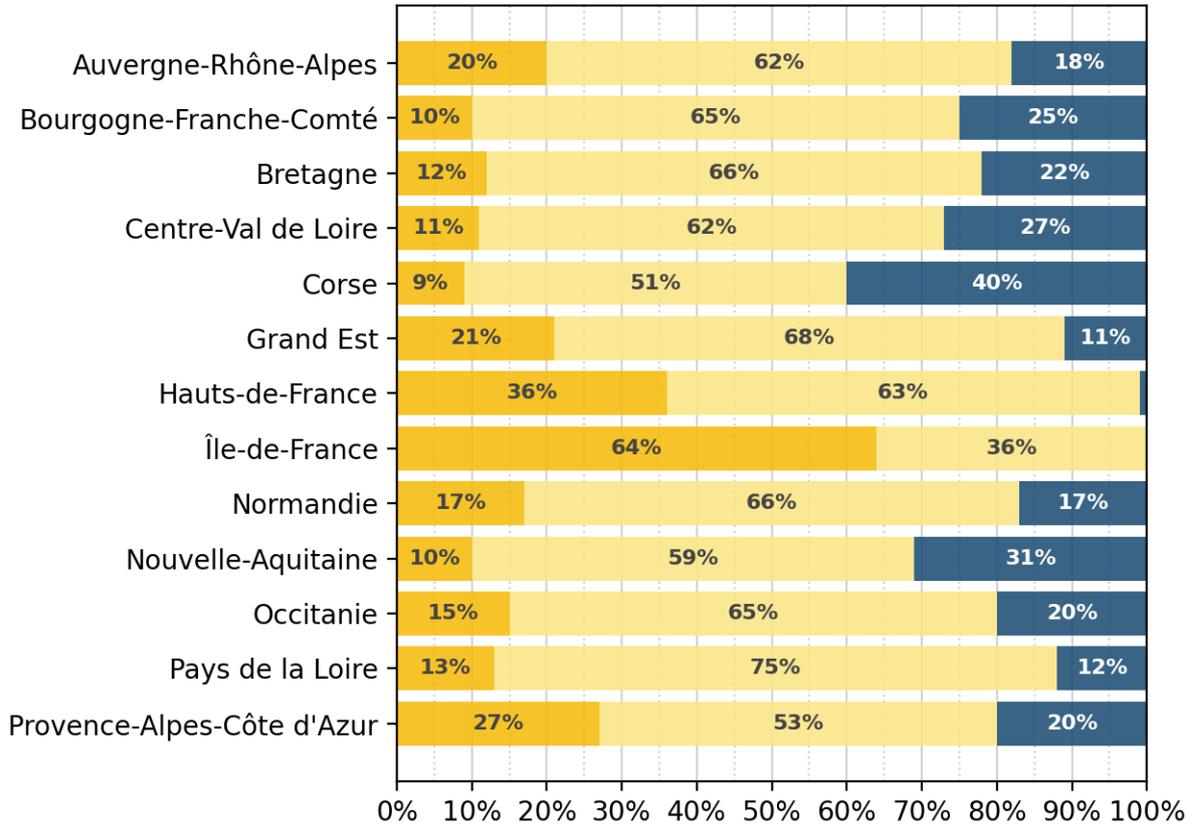
Pays de la Loire 2023 (extrémités de nuit)



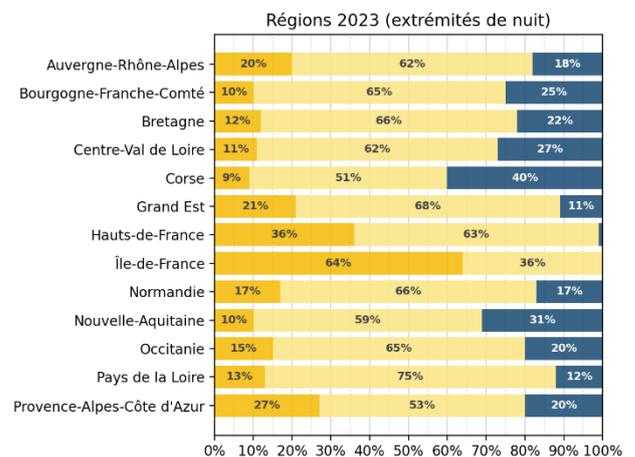
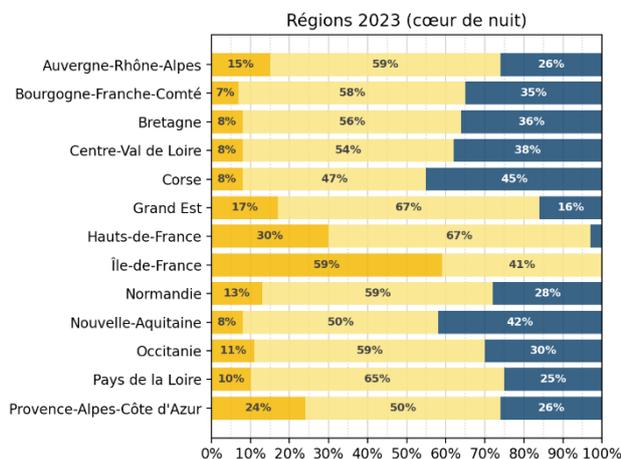
Provence-Alpes-Côte d'Azur 2023 (extrémités de nuit)



Régions 2023 (extrémités de nuit)

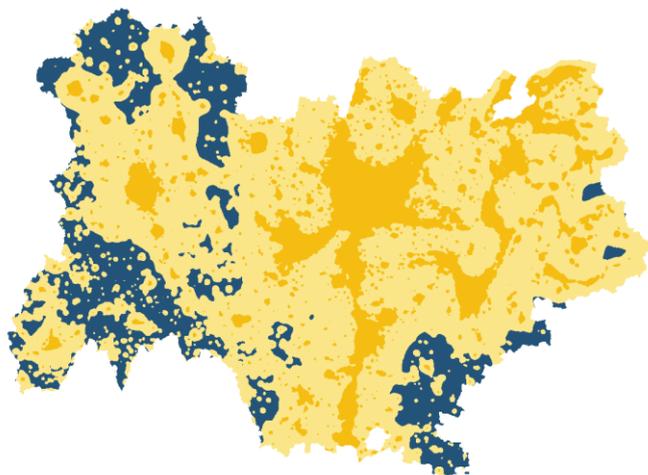


Afin de mieux comparer les différences entre le cœur de nuit et l'extrémité de nuit, les diagrammes récapitulatifs des régions pour ces deux situations sont montrés ci-dessous.

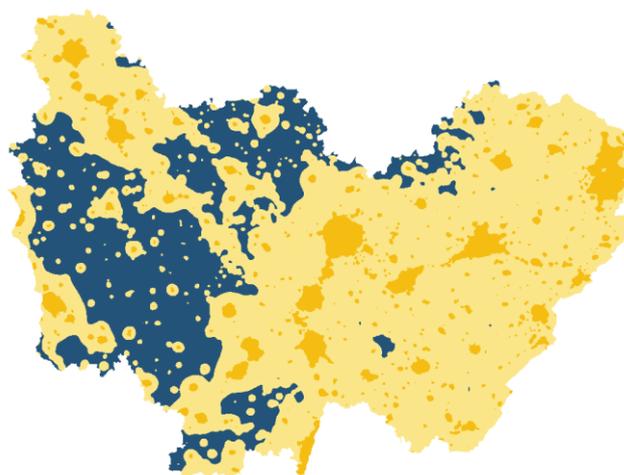


Les 13 cartes des régions françaises sont montrées ci-dessous pour l'année 2023 avec les différentes classes d'extrémités de nuit représentées sur tout le territoire en utilisant leur couleur normalisée (classe 1 en orange, classe 2 en jaune et classe 3 en bleu). Ces cartes peuvent être comparées leur équivalent en cœur de nuit présentées dans la section 3.3 de ce même document. Cela permet de bien apprécier l'impact supplémentaire dans une situation d'extrémités de nuit.

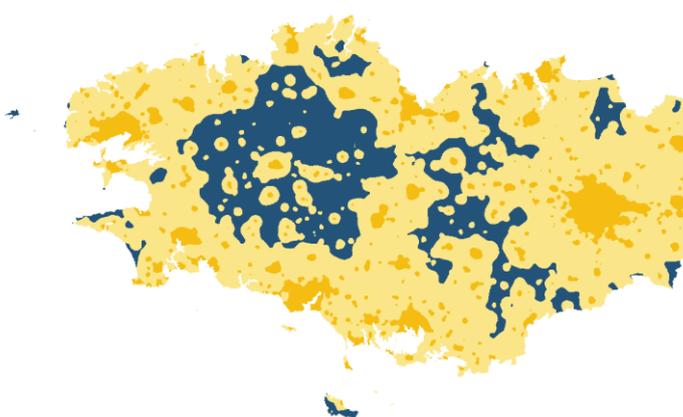
Auvergne-Rhône-Alpes 2023 (extrémités de nuit)



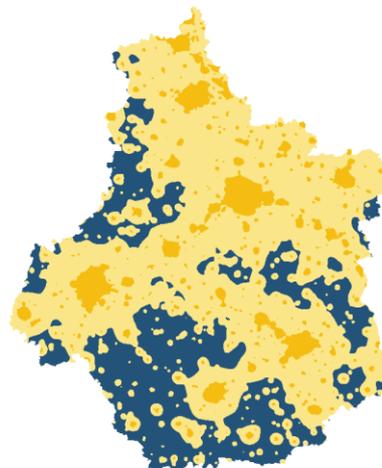
Bourgogne-Franche-Comté 2023 (extrémités de nuit)



Bretagne 2023 (extrémités de nuit)



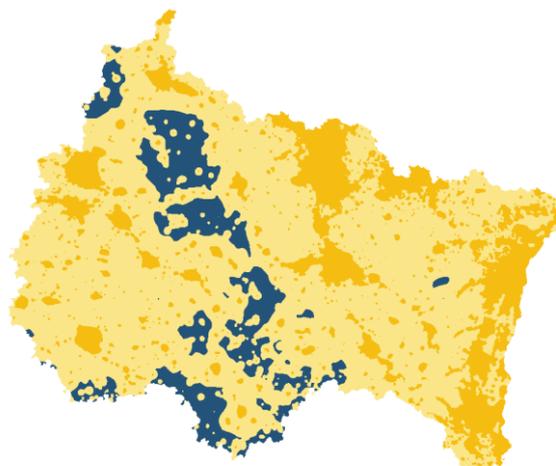
Centre-Val de Loire 2023 (extrémités de nuit)



Corse 2023 (extrémités de nuit)



Grand Est 2023 (extrémités de nuit)



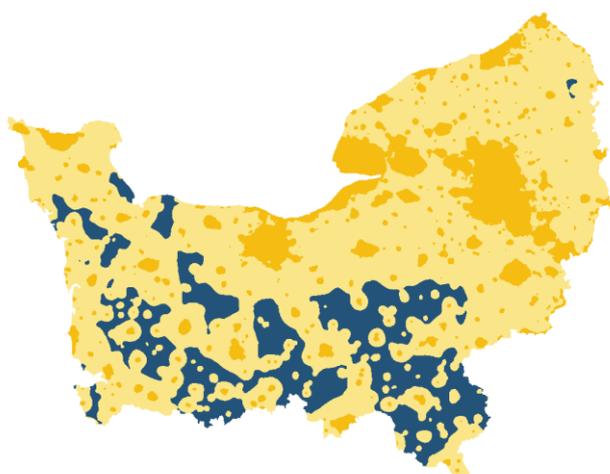
Hauts-de-France 2023 (extrémités de nuit)



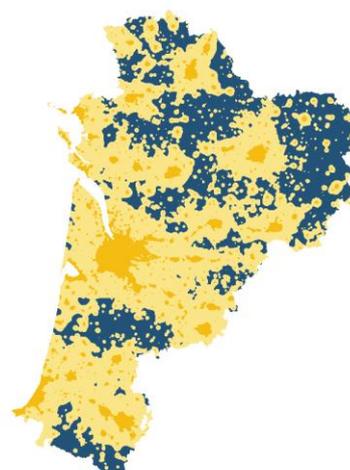
Île-de-France 2023 (extrémités de nuit)



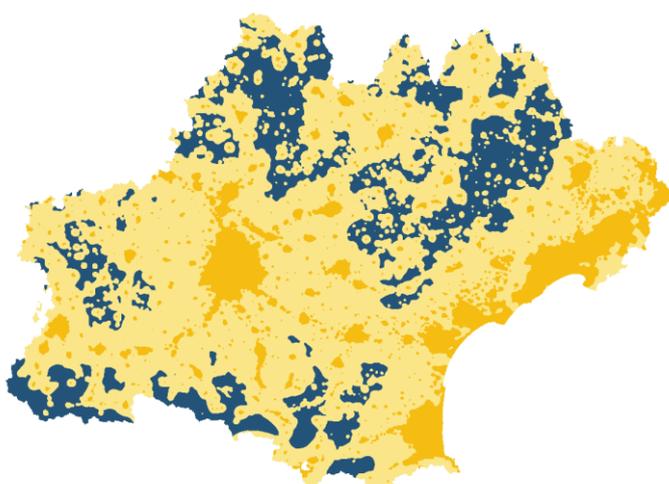
Normandie 2023 (extrémités de nuit)



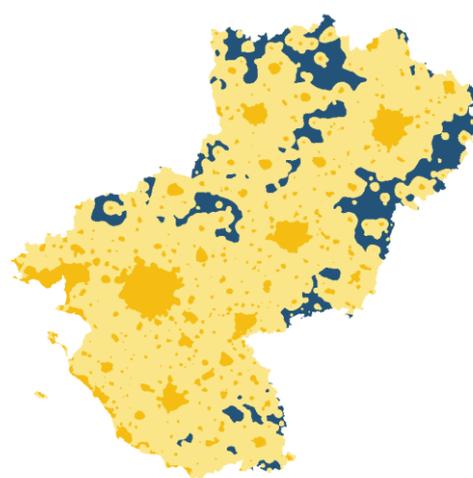
Nouvelle-Aquitaine 2023 (extrémités de nuit)



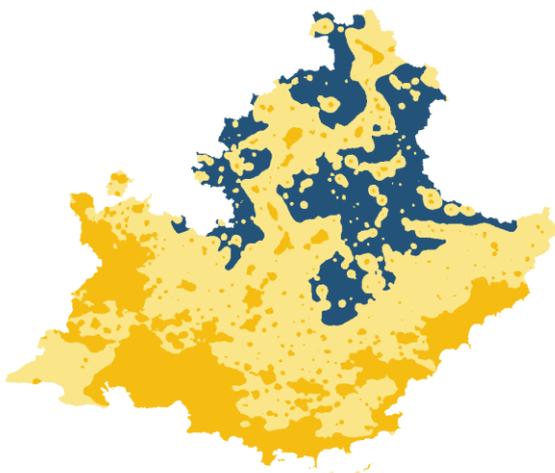
Occitanie 2023 (extrémités de nuit)



Pays de la Loire 2023 (extrémités de nuit)



Provence-Alpes-Côte d'Azur 2023 (extrémités de nuit)



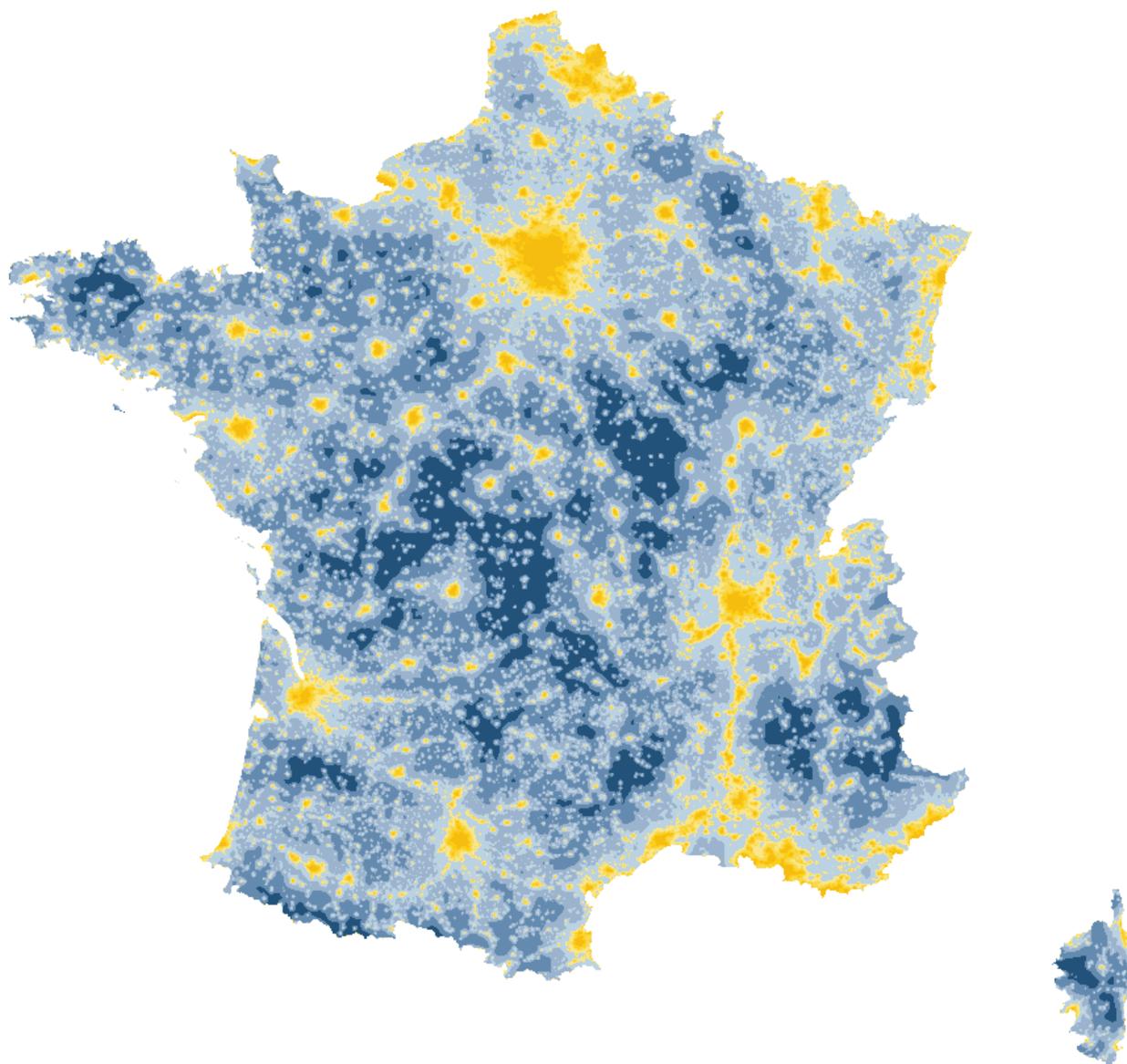
5 Indicateurs 8 classes

La méthodologie de production de l'indicateur a été étendue à un indicateur 8 classes de luminance zénithale. Les bornes et les couleurs utilisées pour représenter chacune des 8 classes sont fournies dans le tableau ci-dessous (les codes HTML sont aussi fournis).

Classe	Bornes de luminance zénithale	Environnement typique où cette qualité de ciel est rencontrée	Couleur
1	$NSB \leq 19,5 \text{ mag/arcsec}^2$	Urbain dense	#f6bd11
2	$19,5 < NSB \leq 20,3 \text{ mag/arcsec}^2$	Urbain	#fece15
3	$20,3 < NSB \leq 20,75 \text{ mag/arcsec}^2$	Suburbain dense	#f7d84e
4	$20,75 < NSB \leq 21,0 \text{ mag/arcsec}^2$	Suburbain	#fae688
5	$21,0 < NSB \leq 21,25 \text{ mag/arcsec}^2$	Transition suburbain / rural	#bbd2e3
6	$21,25 < NSB \leq 21,5 \text{ mag/arcsec}^2$	Rural	#9bb3cc
7	$21,5 < NSB \leq 21,7 \text{ mag/arcsec}^2$	Site sombre	#648baf
8	$NSB > 21,7 \text{ mag/arcsec}^2$	Site très sombre	#225279

L'indicateur 8 classes a été produit pour la France Métropolitaine et les outre-mer dans une situation de cœur de nuit pour toutes les années entre 2014 et 2023. Il a aussi été produit pour la France Métropolitaine dans une situation d'extrémités de nuit uniquement pour l'année 2023. Toutes les valeurs numériques de l'indicateur 8 classes sont fournies dans la feuille de calcul associée à ce rapport.

La carte suivante montre l'indicateur 8 classes de la France Métropolitaine en cœur de nuit pour l'année 2023.



6 Précision de l'indicateur

Un des éléments essentiels lors de la production d'un indicateur de suivi est d'en estimer la précision et la validité. La production de l'indicateur national de pollution lumineuse se base sur un jeu de données de radiance issues de l'imagerie satellite (données fournies par la NOAA qui opère les satellites, voir la section 2.1.1). Les données d'entrée sont fournies en $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$ et une solution pour évaluer la précision avait initialement été proposée qui se basait sur la précision publiée des données de radiance. L'idée consistait à estimer l'incertitude sur le résultat de la modélisation de la luminance zénithale, et donc sur l'indicateur lui-même, en utilisant une approche statistique basée sur la méthode du *bootstrap*. Toutefois, cette approche se heurte à deux problèmes :

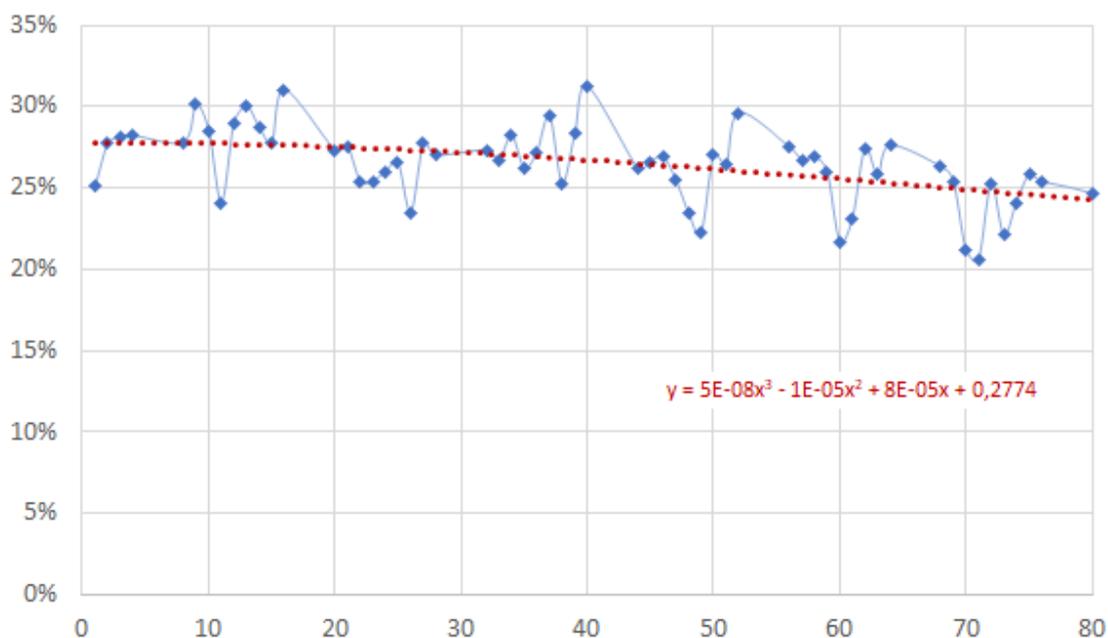
1. Il est difficile d'obtenir dans les documents de référence produits par le NOAA et l'EOG la précision sur les données de radiance ;
2. La méthode du *bootstrap* consiste à faire varier aléatoirement les valeurs de pixels de radiance dans un intervalle pré-déterminé un grand nombre de fois et pour chaque tirage de réaliser une

modélisation et de calculer l'indicateur de pollution lumineuse. Il s'est avéré que cette approche ne pouvait pas fonctionner car les valeurs des pixels de radiance sont corrélées on ne peut donc pas les faire varier aléatoirement de manière indépendante les unes des autres.

Face à cette situation, il a été décidé d'utiliser une autre approche et de se baser sur des composites mensuels de radiance issus de l'instrument VIIRS-DNB. La détermination de la précision de l'indicateur est mise en œuvre de la façon suivante :

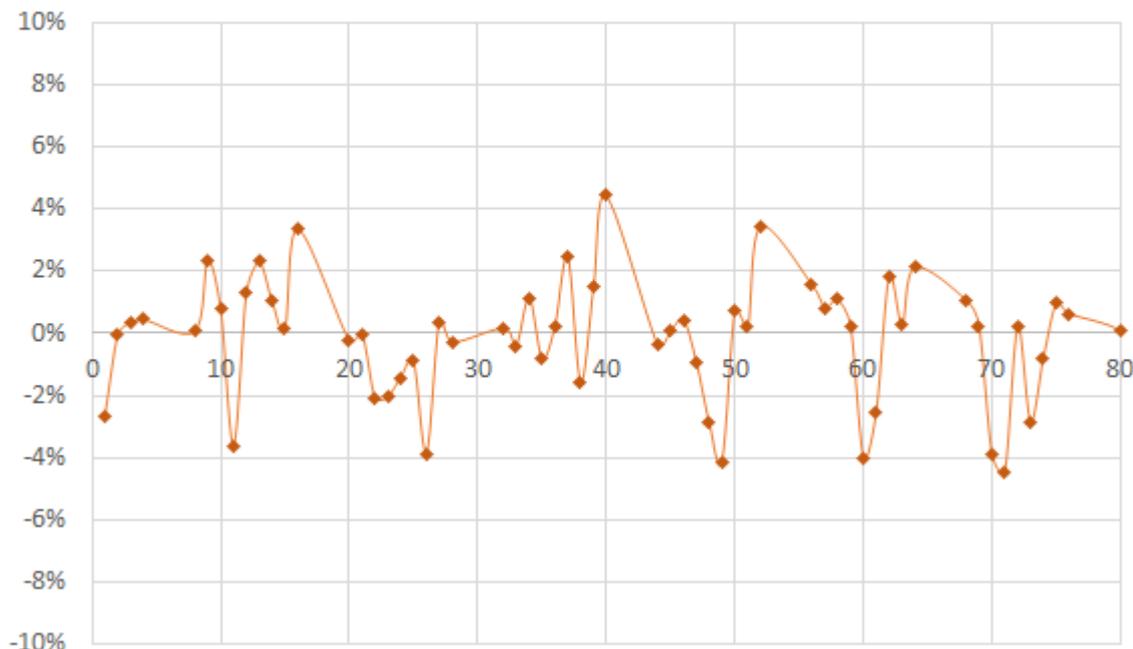
- Pour chaque mois entre janvier 2014 et décembre 2022, on réalise une modélisation de la pollution lumineuse sur la France Métropolitaine à partir du jeu de radiance mensuel correspondant et on calcule l'indicateur de cœur de nuit selon la méthodologie explicitée dans la section 0. On élimine les mois de mai, juin et juillet de chaque année car la qualité des jeux de données sur les mois près du solstice d'été n'est pas suffisante du fait de la latitude moyenne de la France. On ne considère pas non plus les deux mois de novembre et décembre 2022 car les extinctions commencent à être très nombreuses à cette période et faussent la méthode mise en œuvre. On obtient donc en sortie 79 indicateurs correspondant aux 79 mois retenus dans l'analyse.
- Etant donné que les émissions de lumière dans l'environnement nocturne ont diminué au cours des 9 années entre 2014 et 2022, on réalise une régression polynomiale de degré 3 sur toutes les valeurs du ratio de la classe 1 (territoire fortement impacté par la pollution lumineuse). Le degré 3 pour le polynôme de régression a été choisi car la courbe produite s'adapte bien à la tendance observée sur les données. On ne considère que la classe 1 car les hauts niveaux de radiance dans les données VIIRS-DNB sont intrinsèquement moins bruités que les bas niveaux. De plus, des essais sur les autres classes ont montré que l'on obtenait des résultats très similaires. La forme de la courbe polynomiale de régression calculée approxime la décroissance de la classe 1 de l'indicateur au fil des mois. On utilise une régression polynomiale plutôt qu'une régression linéaire car la mise en place des extinctions n'est pas régulière depuis 2014 et s'est accélérée depuis 2020. La figure ci-dessous montre l'évolution de la valeur de la classe 1 de l'indicateur. Les mois sans classe calculés (mai juin et juillet) sont présents sur l'axe horizontal mais n'ont pas de point associé dans le diagramme. La courbe de régression est montrée en pointillés rouges ainsi que son équation.

Classe 1 de l'indicateur de coeur de nuit



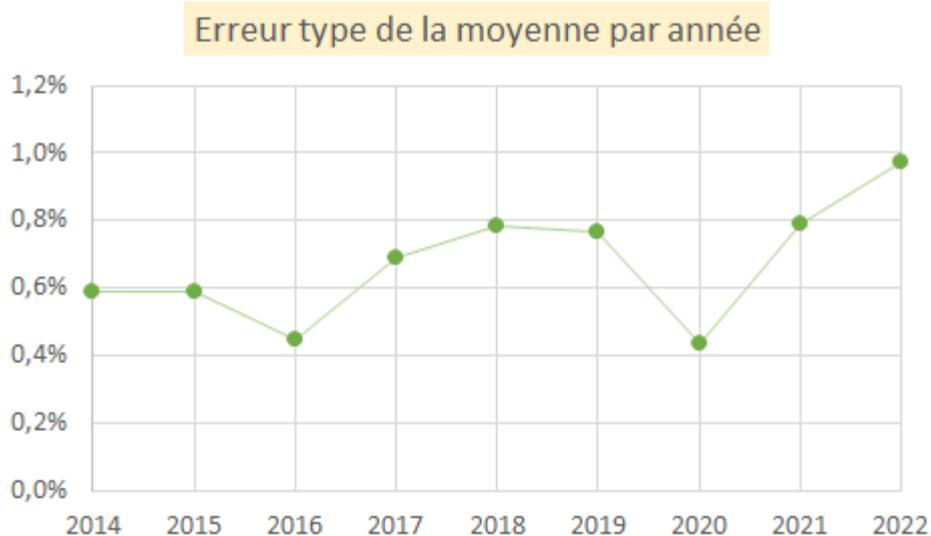
- L'étape suivante consiste à calculer la variation de la valeur de classe 1 pour chaque mois par rapport à la courbe polynomiale de régression. On obtient alors les variations intrinsèques de l'indicateur liées aux données de radiance utilisées en entrée et sans prendre en compte la variation liée à la diminution progressive des émissions de radiance au fil des mois. La figure ci-dessous montre la variation intrinsèque de la classe 1 de l'indicateur.

Variations de la classe 1 de l'indicateur de coeur de nuit



- Maintenant que les variations de la valeur de la classe 1 sont connues, on va déterminer pour chaque année l'erreur type¹¹ de la moyenne des valeurs de l'indicateur. L'erreur type de la moyenne sur une année donnée est calculée en divisant l'écart type des variations de l'année par la racine carrée du nombre de valeurs de l'échantillon. Comme il y a 9 valeurs par année, la racine carrée vaut donc 3. La courbe suivante montre les erreurs types de la moyenne pour les années entre 2014 et 2022.

¹¹ Pour la définition de l'erreur type de la moyenne, voir https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Erreur_type&oldid=207441399



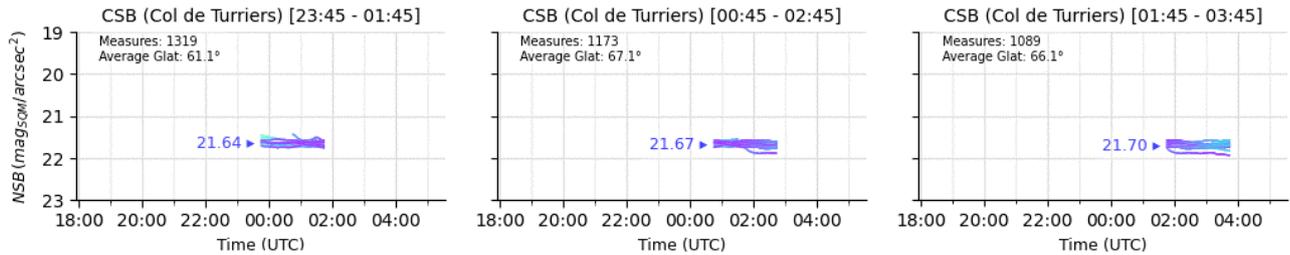
Pour terminer, on calcule la moyenne des erreurs types des différentes années qui vaut 0,67%. Pour un intervalle de confiance à 95%, la précision de l'indicateur peut être estimée à environ deux fois l'erreur-type autour de la valeur de l'indicateur, soit dans notre cas 1,34%.

En conclusion, la précision de l'indicateur de pollution lumineuse peut être estimée à environ **1,34%** du fait des imprécisions inhérentes aux données utilisées (c'est-à-dire les données de radiance satellite VIIRS-DNB). Ainsi, si l'on dit par exemple que 84,6% du territoire subit des pressions dues à la pollution lumineuse, la précision de cette valeur est d'environ +/-0,67% et l'indicateur peut être compris entre 83,9% et 85,3%.

7 Confrontation avec les mesures de terrain

Une fois l'indicateur produit, une étape importante concerne l'estimation de la validité des résultats de la modélisation de la luminance zénithale (qui sert à calculer l'indicateur) par confrontation à des mesures de terrain. Pour cela DarkSkyLab dispose d'un grand nombre de mesure fiables de terrain effectuées sur de nombreux territoires (en France, en outre-mer et à l'étranger) à l'aide de l'instrument Ninox. Le principe de la validation de la qualité de l'indicateur consiste à identifier l'écart entre la valeur de luminance zénithale mesurée et celle prédite par l'indicateur, en prenant soin bien sûr de sélectionner les conditions propices à une telle comparaison (horaire, conditions atmosphériques, absence de la Lune, etc.).

D'une manière générale, les mesures de luminance zénithales par ciel clair et en absence de Lune sur un site et à une heure de la nuit donnés sont dispersées selon un intervalle qui peut aller jusqu'à quelques dixièmes de magnitude. Cela est dû au fait que de nombreux facteurs influent sur la brillance de ciel, que ce soient des facteurs astronomiques (présence de la Voie lactée, présence d'airglow, lumière zodiacale), des facteurs atmosphériques (présence d'aérosols dans l'atmosphère, humidité plus ou moins grande, nuages d'altitude altérant peu l'impression de ciel dégagé, etc.) ou bien des facteurs liés à l'activité humaine (trafic automobile plus ou moins important, éclairage privé variable selon les nuits, etc.). Le diagramme ci-dessous montre plusieurs nuits de mesures sur un même site par temps bien dégagé. La Voie lactée était peu présente durant les nuits de mesure et malgré tout on voit une dispersion assez grande des mesures de luminance zénithale allant jusqu'à 0,4 magnitude dans chacun des fenêtres de 2 heures en cœur de nuit.



Pour décrire la méthodologie utilisée afin de comparer les prédictions du modèle avec des mesures de terrain, on a utilisé les résultats d'une campagne de mesure réalisée en 2024 sur 8 sites du Parc naturel régional Vallée de la Rance – Côte d'Emeraude. Pour chacun des sites, on a déterminé à l'aide des mesures une valeur médiane de luminance zénithale par ciel clair, sans Lune et en cœur de nuit (il y a en effet des variations significatives de la luminance zénithale d'une nuit à l'autre du fait en particulier de charge aérosol qui peut être différente).

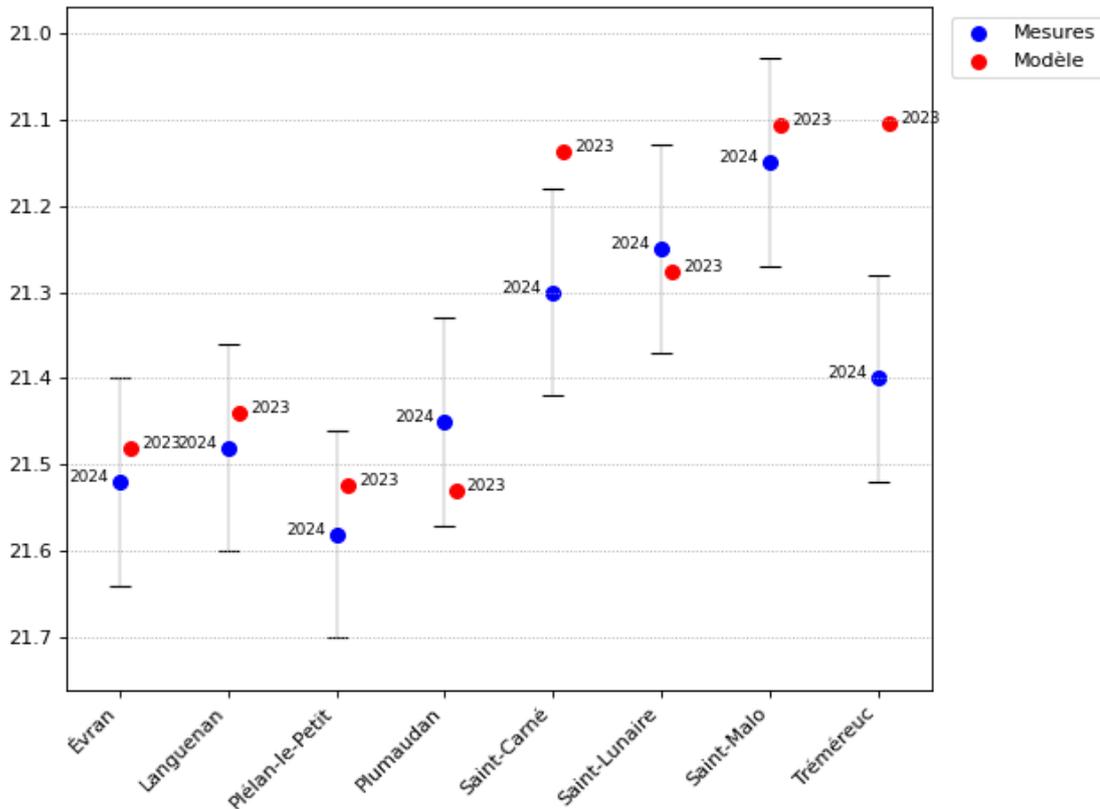
Le tableau ci-dessous montre les 8 lieux mesurés avec leurs coordonnées géographiques et leur luminance zénithale caractéristique de cœur de nuit. La luminance zénithale est exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré (mag/arcsec²).

Lieu	Latitude	Longitude	Luminance zénithale
Évran	48.385550	-2.015790	21.52
Languean	48.514610	-2.154490	21.48
Plélan-le-Petit	48.403310	-2.206370	21.58
Plumaudan	48.379930	-2.136460	21.45
Saint-Carné	48.426730	-2.039250	21.30
Saint-Lunaire	48.628960	-2.112360	21.25
Saint-Malo	48.598400	-2.010620	21.15
Trémereuc	48.565270	-2.060860	21.40

Pour les mesures de terrain, on associe un intervalle d'erreur qui est évalué à +/- 0.12 magnitude. Il s'agit de l'intervalle de +/- 0.10 magnitude fourni par le fournisseur du photomètre utilisé (un Sky Quality Meter, ou SQM, de la société Unihedron) auquel on ajoute +/- 0.02 magnitude supplémentaires pour faire intervenir la variabilité des conditions atmosphériques. Il s'agit d'un l'intervalle minimum dans la mesure où il faudrait aussi prendre en compte des facteurs tels que vieillissement du SQM, le vieillissement du hublot, la variabilité due à l'humidité, etc.).

Concernant les prédictions, on ne cherche pas à associer un intervalle d'erreur dans la mesure où l'on va simplement vérifier dans un premier temps que la prédiction tombe dans l'intervalle d'erreur de la mesure.

Le diagramme ci-dessous montre en bleu les luminances zénithales caractéristiques issues des mesures sur le terrain et en rouge les luminances zénithales issues du modèle utilisé pour le calcul de l'indicateur, ceci pour les 8 sites du territoire d'étude. Une chose importante à remarquer est que les mesures sont réalisées en 2024 et que les luminances zénithales du modèle sont issues des données de radiance moyenne 2023.



On voit que de manière générale, les luminances zénithales modélisés tombent bien dans les intervalles des NSB mesurés, sauf pour deux sites :

- Pour Trémérec, il y a une très grosse différence (21,4 mag/arcsec² mesuré versus 21,1 mag/arcsec² prédit). Il s'agit très clairement d'une modification de l'environnement du site entre 2023 et 2024. Si l'on regarde les pixels de radiance mensuelle autour du site de mesure de Trémérec, on constate par exemple que pour le mois d'avril, il y a une chute très significative de radiance entre 2023 et 2024 de quasiment 50%. Sur le pixel brillant juste au-dessus du site, on passe par exemple de 2,41nW en 2023 à 1,35nW en 2024. Sur le site lui-même, on passe de 0,84 à 0,45nW. C'est la même chose pour tous les pixels autour du site. Il y a donc bien eu une amélioration très importante en 2024, ce qui explique la position du point bleu de mesure sur le site de Trémérec.
- Pour Saint-Carné, on constate aussi une diminution significative sur tous les pixels au nord-est du site (Tressaint), donc à courte distance, sachant que sur Dinan à quelques kilomètres au nord, les pixels restent globalement les mêmes. La mesure plus sombre de 2024 par rapport au modèle de 2023 est donc aussi explicable.

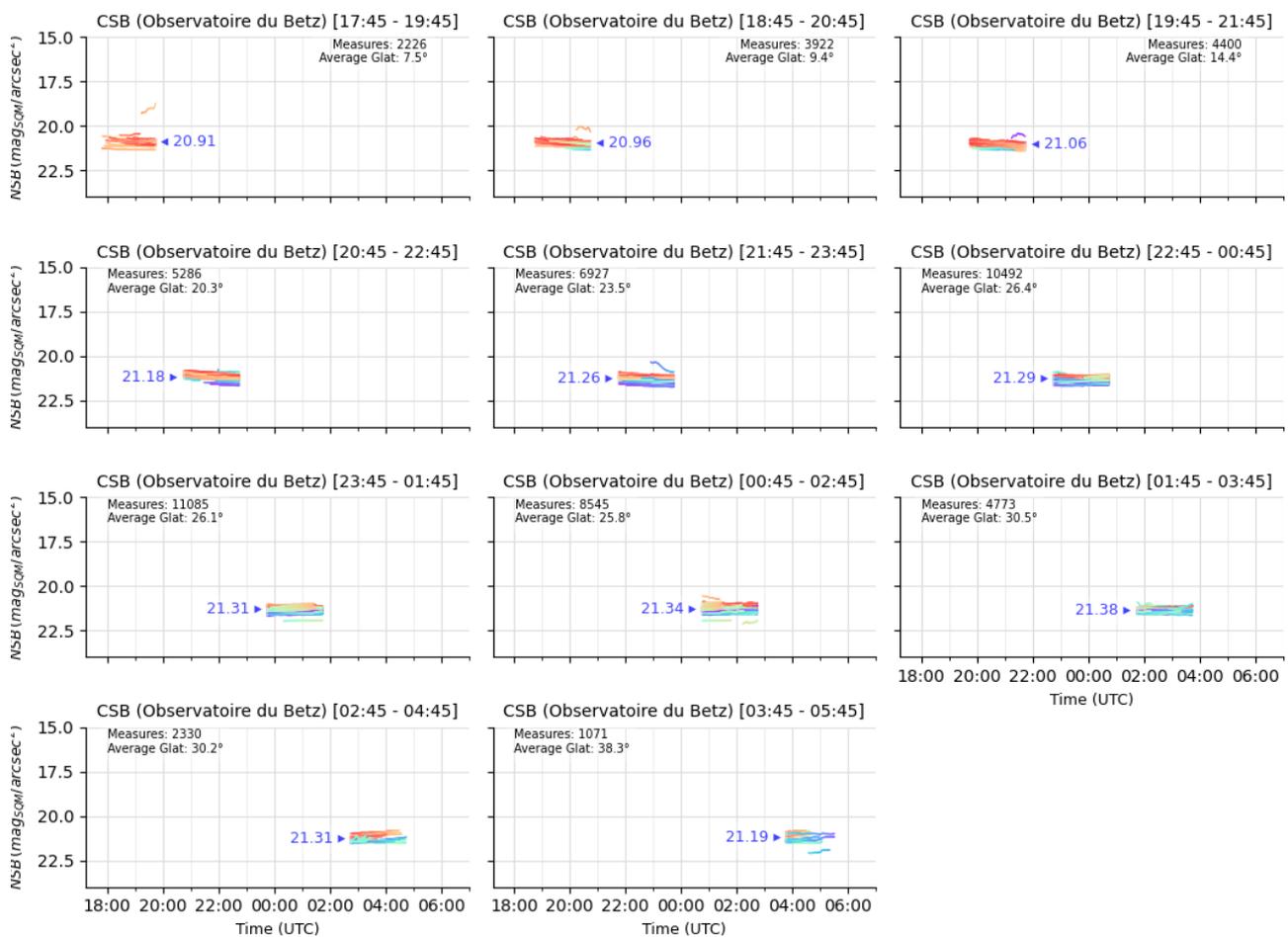
Cet exemple montre qu'il est important de comparer des mesures de terrain qui soient proches temporellement des données de radiance qui sont utilisées pour la modélisation.

Pour confronter les valeurs de luminance zénithales produites par le modèle avec les mesures de terrain, 31 sites en France Métropolitaine ont été retenus en essayant d'être temporellement assez proche de l'année 2023 qui est utilisée pour la modélisation (jeu de données de radiance satellite annuel VIIRS-DNB 2023).

Concernant les mesures de terrain, la détermination d'une valeur caractéristique de NSB (donc de brillance de ciel) par ciel clair pour un site donné est une tâche difficile du fait des multiples conditions

météorologiques possibles qui peuvent affecter les mesures et aussi du fait de la présence de la Voie lactée qui influence significativement la brillance du ciel au zénith en fonction de l'heure de la nuit et des saisons. Pour résoudre ce problème, DarkSkyLab a développé un indicateur appelé le **CSB** pour *Clear Sky Brightness* (ou *brillance de ciel clair*). Il s'agit d'une valeur caractéristique de NSB par temps clair qui peut être programmatically extraite d'un ensemble de mesures Ninox sur quelques semaines ou plus à condition bien sûr qu'il y ait eu quelques nuits claires sans Lune sur la période. Le but du CSB est de reporter une valeur caractéristique de NSB par ciel clair pour un site qui soit plus fiable qu'une estimation de NSB à base de courbes unitaires ou encore de mesures manuelles réalisées avec un SQM.

Un diagramme de CSB est réalisé en calculant les NSB moyens par tranches de 2 heures uniquement pour les nuits qui sont détectées comme essentiellement claires (et bien sûr uniquement pour les portions de nuit sans Lune et avec le Soleil en-dessous de -18° sous l'horizon). Pour filtrer les portions de nuits claires, on utilise un indicateur appelé le **NSS** qui représente la stabilité de la portion de nuit (plus une nuit est nuageuse, plus le profil de NSB est chaotique)¹². Le diagramme ci-dessous montre les valeurs de NSB sur les différentes fenêtres de 2 heures pour un site rural :

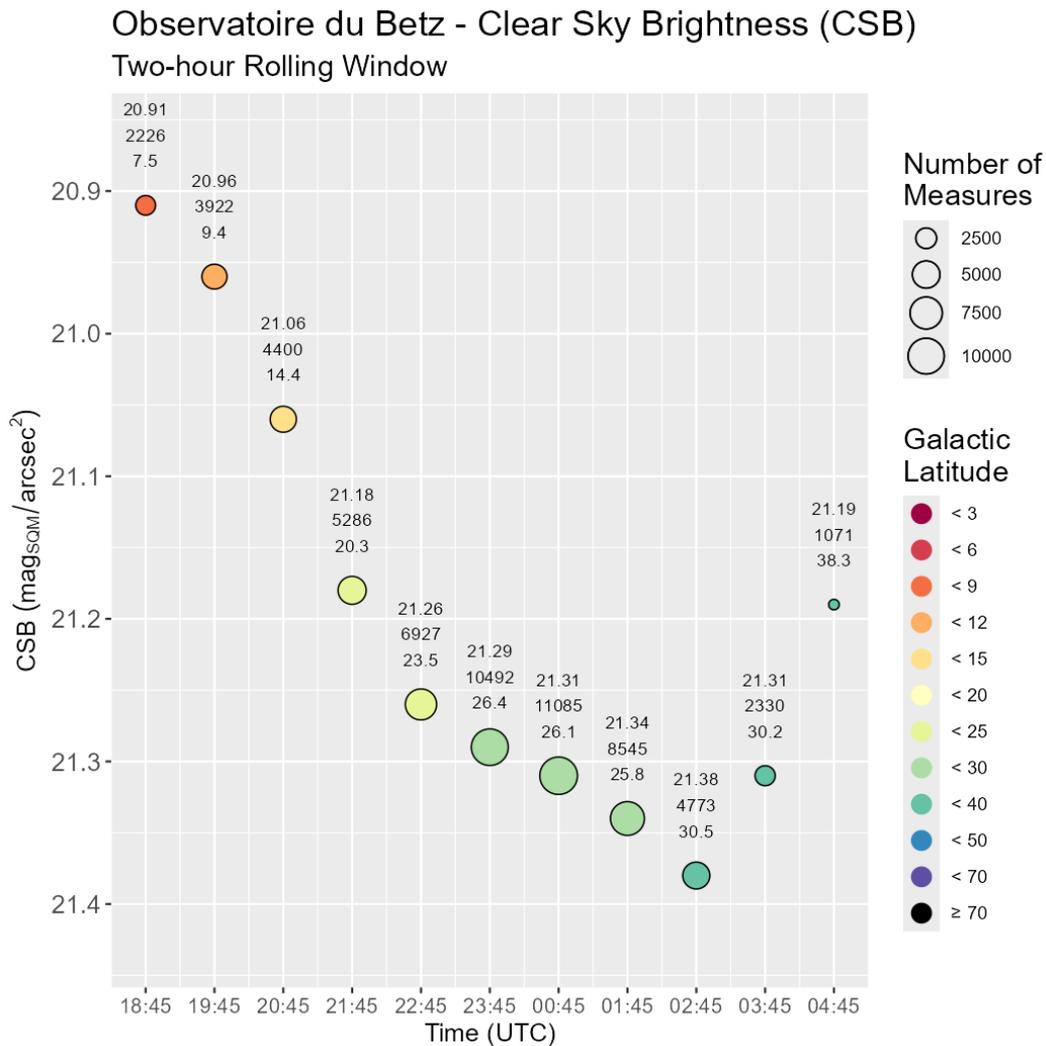


Les valeurs médianes de NSB pour chacune des fenêtres de 2 heures sont indiquées sur le diagramme. Les portions de courbes de NSB dans le diagramme sont tracées avec une couleur qui dépend de la moyenne des valeurs absolues de latitude galactique des mesures de la portion de nuit considérée. Si

¹² La méthode consiste à ajuster un polynôme de degré 10 sur les NSB de la portion de nuit considérée puis à calculer les résidus entre les NSB mesurés et les valeurs polynomiales correspondantes. Le NSS (pour *Night Sky Stability*) est ensuite obtenu en calculant le logarithme en base 10 de la variance des résidus.

la latitude galactique moyenne est faible (ce qui indique que la Voie lactée est très présente au zénith lors des prises de mesure), la couleur rouge est utilisée. Au contraire, si la latitude galactique moyenne est élevée (ce qui indique que la Voie lactée est loin du zénith lors des prises de mesure), la couleur bleue est utilisée. Comme on peut s'y attendre, les portions de nuit en rouge ont des brillances plus élevées (elles sont plus hautes dans les diagrammes) puisque la Voie lactée a contribué à la brillance de ciel lors des nuits claires. Au contraire, les portions de nuit en bleu ont des brillances plus faibles (elles sont plus basses dans les diagrammes) car la Voie lactée n'était pas présente au zénith lors des portions de nuits claires.

La figure ci-dessous montre le **diagramme de CSB** pour le même site sur lequel les valeurs médianes de NSB ont été reportées sur un unique graphique pour toutes les fenêtres de 2 heures :



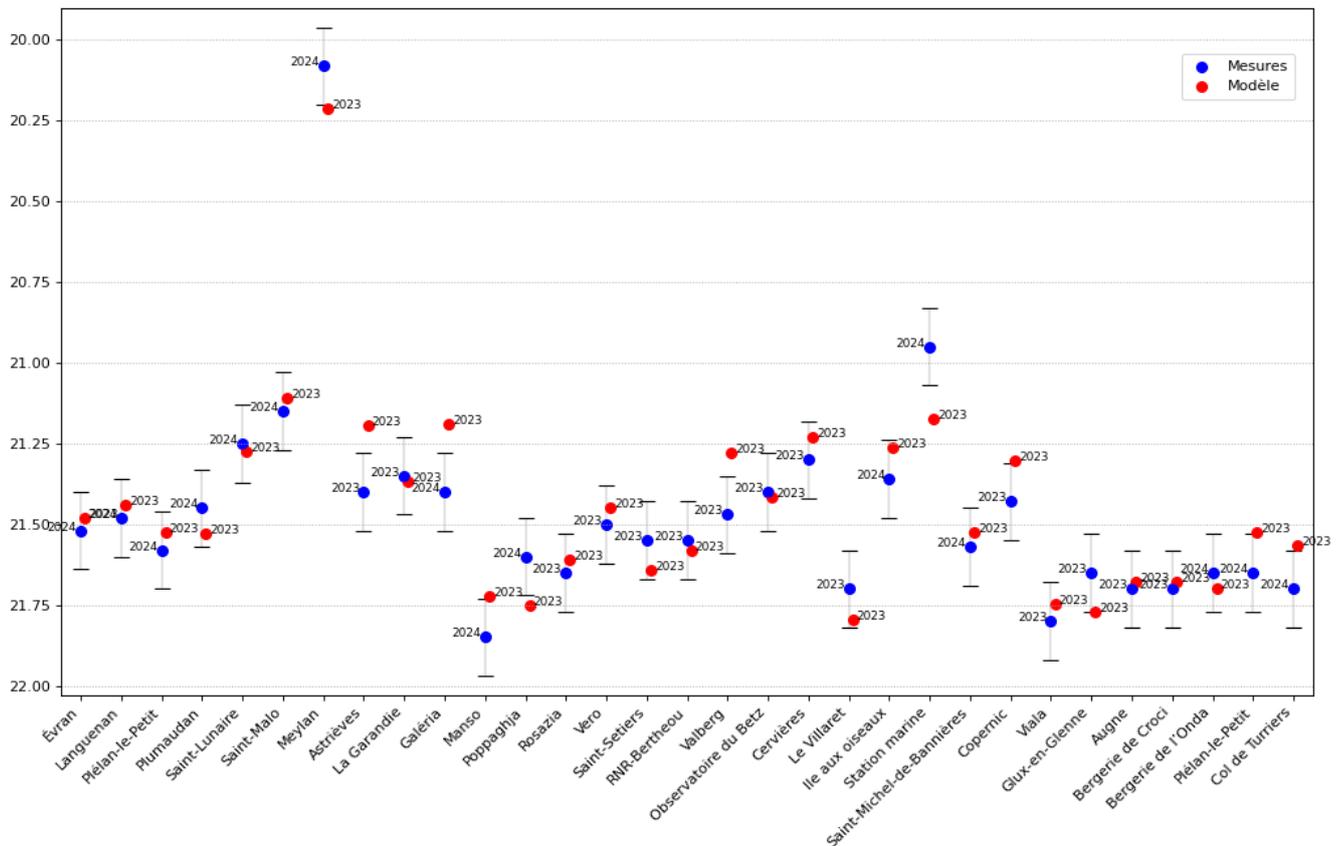
La taille des points dépend du nombre de mesures réalisées dans chaque fenêtre et leur couleur dépend de la valeur moyenne des valeurs absolues des latitudes galactiques sur la fenêtre de 2 heures (au-dessus de chaque point on reporte le NSB médian, le nombre de mesures et la latitude galactique moyenne). La taille et la couleur des points permettent donc de mieux interpréter le diagramme.

Pour le site considéré dans cet exemple, on voit que le meilleur NSB médian avec un nombre significatif de mesures est obtenu pour la fenêtre de 2 heures centrée sur 02:45 UTC avec une valeur de CSB de **21,38 mag/arcsec²**. Il s'agit là du **CSB**, donc de la valeur caractéristique de NSB par ciel clair du site. On constate qu'en début de nuit, les valeurs de NSB médians sont beaucoup plus basses (représentant

donc des ciels plus brillants) du fait de l'absence d'extinction et aussi d'une présence de la Voie lactée plus marquée (points de couleur orange).

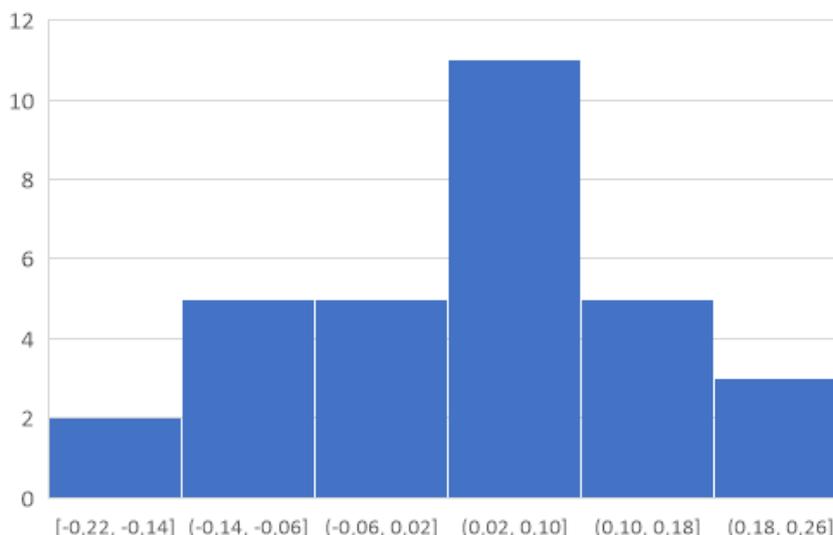
C'est cette valeur de CSB qui est utilisée pour comparer les résultats des mesures de terrain avec les prédictions du modèle. S'il s'avère que le CSB retenu possède une latitude galactique moyenne faible (donc avec une présence importante de la Voie lactée), la valeur de NSB caractéristique peut être corrigée en analysant les courbes de nuits claires individuelles.

La figure ci-dessous montre les résultats obtenus pour les 31 sites. Comme pour le diagramme de comparaison précédent, les NSB caractéristiques mesurés sur le terrain sont en bleu et les prédictions du modèle en rouge.



La répartition des écarts entre les mesures de terrain et les prédictions du modèle est montrée dans le diagramme ci-dessous.

Histogramme des écarts



La plupart des prédictions de luminosité zénithale du modèle tombent dans les intervalles de précision des mesures de terrain ($\pm 0,12$ mag/arcsec²). Pour celles qui sont en-dehors des intervalles, plusieurs explications sont possibles selon les sites :

- Les mesures ont été réalisées à des périodes où les émissions de lumière dans l'environnement nocturne ne correspondent pas aux radiances fournies dans le jeu de radiance annuelle utilisé (en l'occurrence 2023). Sur la période de mesure, des éclairages saisonniers peuvent être présents par exemple ;
- Le traitement des données de radiance pour en faire un jeu moyen annuel peut avoir fait disparaître certaines spécificités présentes durant la période de mesures (charges aérosols plus ou moins importante, humidité, etc.).
- Il peut y avoir des conditions très locales au site de mesure en termes d'injection de lumière dans l'environnement nocturne qui n'apparaissent pas dans les données de radiance satellite du fait de leur résolution (de l'ordre de 500 mètres). C'est d'ailleurs souvent un problème lors des sessions de mesure avec les photomètres Ninox mis en œuvre par DarkSkyLab. Une source proche peut modifier de manière importante les luminances zénithales relevées et fausser la détermination d'un NSB caractéristique à une échelle plus élevée.
- Le modèle lui-même peut être à l'origine d'une partie des différences observées sachant que le processus qui consiste à passer de radiances moyennes observées depuis l'espace à une prédiction de brillance de ciel depuis le sol induit nécessairement des approximations.

D'une façon globale, on peut tout de même constater qu'il y a un accord très satisfaisant entre les mesures de luminosité zénithale réalisées sur le terrain et les prédictions fournies par le modèle utilisé. On peut donc légitimement considérer que les valeurs des différentes classes de l'indicateur national de pollution lumineuse sont valides avec un intervalle de confiance raisonnable.

8 Conclusion

Dans ce document, nous avons présenté et actualisé la méthodologie utilisée pour produire l'indicateur national de suivi de la pollution lumineuse. Cette méthodologie s'appuie sur l'utilisation de jeux de données satellite annuels basse résolution qui, outre le fait qu'ils sont disponibles gratuitement à partir de l'année 2014, permettent des comparaisons année après année, ce qui est un prérequis important pour la constitution d'un indicateur susceptible d'évoluer au cours du temps.

Le calcul de l'indicateur passe par une phase de « diffusion » des données de radiance afin d'obtenir une estimation de la qualité du ciel par nuit claire et sans Lune (la luminance zénithale) en tout point du territoire français. Cela impose d'utiliser un logiciel spécifique qui n'est pas disponible publiquement mais que DarkSkyLab s'engage à pérenniser afin de permettre de recréer à l'identique l'indicateur national de suivi de la pollution lumineuse à l'avenir à la demande de l'ONB.

Dans ce rapport, nous avons montré qu'il est important non seulement de fournir un indicateur de cœur de nuit mais aussi de mettre en œuvre un indicateur d'extrémités de nuit. Ce second indicateur s'avère très différent de celui de cœur de nuit du fait des très nombreuses extinctions et gradations de puissance qui sont maintenant mises en œuvre par les collectivités sur le territoire de la France Métropolitaine. Il est important de prendre en compte ce second indicateur d'extrémités de nuit car l'assombrissement du territoire suggéré par les données satellite pourrait laisser penser que les pratiques d'éclairage se sont constamment et systématiquement améliorées au cours des dernières années. Dans les faits, il est au contraire très probable que la quantité de lumière injectée dans l'environnement nocturne en début et fin de nuit a continué à progresser légèrement au cours des dernières années.

Un des objectifs du travail réalisé consistait aussi à évaluer l'évolution de l'indicateur national de pollution lumineuse sur une période de 10 ans entre 2014 et 2023. Cela a permis de confirmer une tendance à l'assombrissement en cœur de nuit en France Métropolitaine, tendance qui s'est accélérée à partir de 2020. L'ajout des outre-mer au périmètre de l'étude a permis de produire les mêmes indicateurs pour ces territoires que pour la France Métropolitaine. Les résultats sont très contrastés selon les territoires, mais, dans la plupart des cas, on ne constate pas d'amélioration de la situation de cœur de nuit au fil des années sur ces territoires comme c'est le cas pour la France Métropolitaine.

La mise à jour de l'indicateur national de pollution lumineuse a aussi été l'occasion de territorialiser l'indicateur à la fois pour les régions et les départements de la Métropole, que ce soit pour les situations de cœur de nuit ou d'extrémités de nuit. Les résultats obtenus forment une masse importante de données qu'il sera intéressant d'exploiter pour mieux comprendre la situation de chaque territoire vis-à-vis des problématiques de la pollution lumineuse.

Dans ce rapport, nous avons aussi évalué la précision de l'indicateur et confronté les prédictions du modèle utilisé aux mesures de terrain. Cette double évaluation nous rend confiant dans le fait que les indicateurs produits sont solides et pertinents.

Annexe A – Code du script de calcul de l'indicateur

```
# -*- coding: utf8 -*-

#=====
#                               Light Pollution Indicator
#=====
__author__      = "Philippe Deverchère"
__copyright__   = "Copyright 2023, DarkSkyLabt / ONB"
__credits__     = ["Philippe Deverchère"]
__license__     = "Proprietary"
__version__     = "1.0.1"
__maintainer__  = "Philippe Deverchère"
__email__       = "philippe@darkskylab.com"
__status__      = "Production"

import os
import sys
import numpy as np
import pandas as pd
from osgeo import gdal_array
import matplotlib.pyplot as plt
from qgis.utils import iface
from qgis.core import *
import processing
from PyQt5.QtGui import *
import subprocess

#=====
def largestRemainderMethod(pd_series, decimals=1):
    """
    Round a series of values to make a total of 100%
    Parameter:
        pd_series      Pandas series with the ratios to be normaized
        decimals       Number of decimal places to be used in the normalized ratios
    Return:
        Pandas series with the normalized ratios
    """
    floor_series = ((10**decimals * pd_series).astype(np.int)).apply(np.floor)
    diff = 100 * (10**decimals) - floor_series.sum().astype(np.int)
    series_decimals = pd_series - floor_series / (10**decimals)
    series_sorted_by_decimals = series_decimals.sort_values(ascending=False)
    for i in range(0, len(series_sorted_by_decimals)):
        if i < diff:
            series_sorted_by_decimals.iloc[[i]] = 1
        else:
            series_sorted_by_decimals.iloc[[i]] = 0
    out_series = ((floor_series + series_sorted_by_decimals) / (10**decimals)).sort_values(ascending=False)
    return out_series.sort_index().to_list()

#=====
def compute_light_pressue_indicator(interactive, p_step, p_splits, \
                                   p_working_dir, p_input_raster, \
                                   p_output_raster, p_title_chart):
    """
    Compute a light pressure indicator.
    Parameters:
        interactive     Boolean to specify if parameters must be obtained
                       intercatively from the user
        p_step          Step in meters if not interactive
        p_splits        NSB split values if not interactive
    """

```

```

    p_working_dir    Working directory where files are stored
    p_input_raster   Name of the luminance input raster
    p_output_raster  Name of the output raster if not interactive (without
                    extension)
    p_title_chart    Title chart if not interactive
Return:
    ""
    nothing
"""
if interactive:
    # Get the correct layer and check it is a raster
    layer = iface.activeLayer()
    layer_name = layer.name()
    layer_path = unicode(layer.dataProvider().dataSourceUri())
    layer_dir = os.path.dirname(layer_path)
    layer_file = os.path.basename(layer_path)
else:
    layer_name = p_input_raster
    layer_dir = p_working_dir
    layer_file = p_input_raster
    layer_path = layer_dir + '/' + layer_file
filename, file_extension = os.path.splitext(layer_file)
if file_extension != '.tif':
    QMessageBox.critical(None, "Error",
        'Layer "%s" is not a raster.\nProcess has been stopped'%layer_name)
    return

# Get parameters
#-----
# Step
if interactive:
    text, ok = QDialog.getText(iface.mainWindow(),
        'Reprojection step',
        'Enter the step to be used\nin reprojection (meters):')
    if not ok:
        print('Indicator processing canceled')
        return
    try:
        step = int(text)
    except:
        QMessageBox.critical(None, "Error",
            'Step value %s is not an integer.\nProcess has been stopped'%text)
        return
else:
    step = p_step
# NSB split values
if interactive:
    text, ok = QDialog.getText(iface.mainWindow(),
        'NSB split values',
        'Enter the NSB split values in ascending order\nand separated by spaces:')
    if not ok:
        print('Indicator processing canceled')
        return
    l_NSB_split = []
    for item in text.split(' '):
        try:
            l_NSB_split.append(float(item))
        except:
            QMessageBox.critical(None, "Error",
                'Split value %s is not a float.\nProcess has been stopped'%item)
            return
else:
    l_NSB_split = p_splits
l_NSB_split.append(23.0)
table_classify = []
for i, nsb in enumerate(l_NSB_split):
    if i == 0:

```

```

        table_classify.append(0)
    else:
        table_classify.append(int(l_NSB_split[i-1]*100))
        table_classify.append(int(nsb*100))
        table_classify.append(i+1)
s_table = '['
for i, item in enumerate(table_classify):
    if i == len(table_classify) - 1:
        s_table += str(item) + ']'
    else:
        s_table += str(item) + ', '
# Output file name
if interactive:
    text, ok = QDialog.getText(iface.mainWindow(),
                              'Output raster name',
                              'Enter the name of the output raster\nwithout extension:')
    if not ok:
        print('Indicator processing canceled')
        return
    output_raster = text
else:
    output_raster = p_output_raster
# Chart title
if interactive:
    text, ok = QDialog.getText(iface.mainWindow(),
                              'Chart title',
                              'Enter the title of the chart (empty for default):')
    if not ok:
        print('Indicator processing canceled')
        return
    if text == '':
        chart_title = 'Indicateur de pression de la lumière'
    else:
        chart_title = text
else:
    chart_title = p_title_chart

# Confirm the processing
#-----
if interactive:
    reply = QMessageBox.question(iface.mainWindow(),
                                'Confirm raster processing',
                                'Are you sure you want to process the raster "%s"?\n'%layer_name +
                                ' Layer: %s\n'%layer_file[:-4] +
                                ' Step: %d m\n'%step +
                                ' Table: %s\n'%s_table +
                                ' Output raster: %s\n'%output_raster +
                                ' Chart title: %s\n\n'%chart_title +
                                'Processing might take a while.',
                                QMessageBox.Yes, QMessageBox.No)
    if reply == QMessageBox.No:
        print('Indicator processing canceled')
        return
    else:
        print('Processing raster %s with:\n'%p_input_raster + \
              ' Step %dm\n'%step + \
              ' Table: %s\n'%s_table + \
              ' Output raster: %s\n'%output_raster + \
              ' Chart title: %s\n'%chart_title, flush=True)

# Resampling and reprojecting of the raster
#-----
print('Resampling and reprojecting raster...', flush=True)
"""
# Version using the gdalwarp command line (display an extra black window)
process = subprocess.Popen(['gdalwarp', '-co', 'COMPRESS=DEFLATE',

```

```

        '-co', 'ZLEVEL=9', '-co', 'PREDICTOR=2', '-ot', 'Float32',
        '-r', 'bilinear', '-srcnodata', '-9999', '-t_srs', 'EPSG:2154',
        '-tr', '80', '80', '-tap', '-overwrite',
        layer_path, layer_dir + '/tmp1.tif'], stdout=subprocess.PIPE)
process.wait()
stdout = process.communicate()[0]
#print(stdout)
"""
if os.path.exists(layer_dir + '/tmp1.tif'):
    os.remove(layer_dir + '/tmp1.tif')
params = {"INPUT": layer_path,
          "DATA_TYPE": 6, # Float32
          "TARGET_CRS": QgsCoordinateReferenceSystem("EPSG:2154"),
          "EXTRA": "-r bilinear -co COMPRESS=DEFLATE -co ZLEVEL=9 -co PREDICTOR=2 -tr %d %d -tap"%(step, step),
          "NODATA": -9999,
          "OUTPUT": layer_dir + '/tmp1.tif'}
processing.run('gdal:warp', params)
print('Rasemapling and reprojecting done', flush=True)

# Apply formula on pixels to simplify the raster and multiply values by 100
#-----
print('Simplifying the raster...', flush=True)
if os.path.exists(layer_dir + '/tmp2.tif'):
    os.remove(layer_dir + '/tmp2.tif')
parameters = {'INPUT_A' : layer_dir + '/tmp1.tif',
              'BAND_A' : 1,
              'FORMULA' : 'rint(100*round_(A*20, 0)/20.0)',
              'OUTPUT' : layer_dir + '/tmp2.tif',
              'RTYPE' : 1}
processing.run('gdal:rastercalculator', parameters)
print('Simplifying done', flush=True)

# Reclassify the raster
#-----
print('Reclassifying the raster...', flush=True)
if os.path.exists(layer_dir + '/tmp3.tif'):
    os.remove(layer_dir + '/tmp3.tif')
params = {
    'DATA_TYPE': 1,
    'INPUT_RASTER': layer_dir + '/tmp2.tif',
    'NODATA_FOR_MISSING': False,
    'NO_DATA': -9999,
    'OUTPUT': layer_dir + '/tmp3.tif',
    'RANGE_BOUNDARIES': 1, # min <= value < max
    'RASTER_BAND': 1,
    'TABLE': table_classify
}
processing.run('qgis:reclassifybytable', params)
print('Reclassifying done', flush=True)

# Compress and create output raster
#-----
print('Compressing raster...', flush=True)
params = {"INPUT": layer_dir + '/tmp3.tif',
          "EXTRA": "-co COMPRESS=DEFLATE -co ZLEVEL=9 -co PREDICTOR=2",
          "OUTPUT": layer_dir + '/' + output_raster + '.tif'}
processing.run('gdal:translate', params)
print('Compressing done...', flush=True)

# Delete temporary files
#-----
if os.path.exists(layer_dir + '/tmp1.tif'):
    os.remove(layer_dir + '/tmp1.tif')
if os.path.exists(layer_dir + '/tmp2.tif'):
    os.remove(layer_dir + '/tmp2.tif')
if os.path.exists(layer_dir + '/tmp3.tif'):

```

```

os.remove(layer_dir + '/tmp3.tif')

# Compute the zonal statistics
#-----
print('Computing raster zonal statistics...', flush=True)
tif_file = layer_dir + '/' + output_raster + '.tif'
gpkg_file = layer_dir + '/' + output_raster + '.gpkg'
parameters = {'INPUT' : tif_file,
              'BAND' : 1,
              'ZONES' : tif_file,
              'ZONES_BAND' : 1,
              'OUTPUT_TABLE': gpkg_file
             }
processing.run('qgis:rasterlayerzonalstats', parameters)
print('Zonal statistics computing done', flush=True)

# Extract statistics
#-----
print('Analyzing produced Geopackage %s'%os.path.basename(gpkg_file), \
      flush=True)
layer = QgsVectorLayer(gpkg_file)
index_surface = -1
index_zone = -1
for i, field in enumerate(layer.fields()):
    if field.name() == 'area' or field.name() == 'm2' or \
       field.name() == 'm²':
        index_surface = i
        #print('  Surface index is ', str(i))
    if field.name() == 'zone':
        index_zone = i
        #print('  Zone index is ', str(i))
if index_surface <= -1:
    print('Error: surface field is not defined in %s'%gpkg_file)
    return
if index_zone <= -1:
    print('Error: zone field is not defined in %s'%gpkg_file)
    return
print('Extracting statistics from: ', output_raster + '.gpkg')
features = layer.getFeatures()
total_surface = 0
l_zone = []
l_surface = []
for feature in features:
    attrs = feature.attributes()
    zone = attrs[index_zone]
    surface = attrs[index_surface]
    total_surface += surface
    l_zone.append(int(zone))
    l_surface.append(surface)
l_zone, l_surface = zip(*sorted(zip(l_zone, l_surface)))
l_ratios = []
for surface in l_surface:
    l_ratios.append(surface/total_surface)
# Round the ratios to the first decimal place
l_ratios = [x*100.0 for x in l_ratios]
l_ratios = largestRemainderMethod(pd.Series(l_ratios), 1)
l_ratios = [x/100.0 for x in l_ratios]
nb_classes = len(l_ratios)
print('Number of classes: %d'%nb_classes)
# Build the class strings
l_s_zone = []
for zone in l_zone:
    if nb_classes == 8:
        l_s_zone.append('%d'%zone)
    else:
        l_s_zone.append('Classe %d'%zone)

```

```

# Plot the pie chart and save it
#-----
# Colors
if nb_classes == 2:
    colors = ['#E63E11', '#038141'] # Red, Green
elif nb_classes == 3:
    colors = ['#E63E11', '#FECB02', '#038141'] # Red, Orange, Green
elif nb_classes == 4:
    colors = ['#E63E11', '#FECB02', '#FFFF80', '#038141'] # Red, Orange, Yellow, Green
elif nb_classes == 8:
    colors = ['#d0000d', '#ff2d34', '#feb517', '#ffea01', '#00e80b', '#01ffe6', '#0066ff', '#0000b0'] # ONB colors
fig, ax = plt.subplots()
if nb_classes == 8:
    wedges, texts, autotexts = ax.pie(l_ratios, labels = l_s_zone, \
                                     colors = colors, startangle = 90, \
                                     pctdistance=1.2, labeldistance=0.8, \
                                     autopct='%1f%%')
    plt.setp(autotexts, size=10, weight="bold")
    for text in texts:
        text.set_horizontalalignment('center')
else:
    wedges, texts, autotexts = ax.pie(l_ratios, labels = l_s_zone, \
                                     colors = colors, startangle = 90, \
                                     autopct='%1f%%')
    plt.setp(autotexts, size=11, weight="bold")
if len(l_ratios) == 3:
    for i, autotext in enumerate(autotexts):
        if i == 0 or i == 2:
            autotext.set_color('white')
plt.setp(texts, size=12, style="italic")
ax.set_title(chart_title, fontsize=16)
plt.savefig(layer_dir + '/' + output_raster + '.png')
plt.show()

# Interactive mode
#=====
compute_light_pressue_indicator(True, 0, [], '', '', '', '')

# Automatic mode
#=====
"""
compute_light_pressue_indicator(False, 80, [21.0, 21.5], \
    'D:/Indicateur ONB/SIMULATIONS', \
    'simu_france_2020_grid_georef_clip.tif', \
    'indicateur_france_2020', \
    'Indicateur pollution lumineuse France (2020)')
"""

```

Annexe B – Détail des indicateurs de cœur de nuit