

# Un nouvel atlas mondial de la luminosité artificielle du ciel nocturne

Fabio Falchi<sup>1,\*</sup>, Pierantonio Cinzano<sup>1</sup>, Dan Duriscoe<sup>2</sup>, Christopher C. M. Kyba<sup>3,4</sup>, Christopher D. Elvidge<sup>5</sup>, Kimberly Baugh<sup>6</sup>, Boris A. Portnov<sup>7</sup>, Nataliya A. Rybnikova<sup>7</sup> and Riccardo Furgoni<sup>1,8</sup>

Appartenance des Auteurs.

<sup>1</sup>*Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso (Institut des sciences et de technologie de la pollution lumineuse), 36016 Thiene, Italy.*

<sup>2</sup>*National Park Service, U.S. Department of Interior, Natural Sounds and Night Skies Division, Fort Collins, CO 80525, USA.*

<sup>3</sup>*Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Germany.*

<sup>4</sup>*Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries, Berlin, Germany.*

<sup>5</sup>*Earth Observation Group, National Oceanic and Atmospheric Administration's National Centers for Environmental Information, Boulder, CO 80305, USA.*

<sup>6</sup>*Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA.*

<sup>7</sup>*Department of Natural Resources and Environmental Management, Faculty of Management, University of Haifa, 3498838 Haifa, Israel.*

<sup>8</sup>*American Association of Variable Star Observers, Cambridge, MA, USA.*

\*Pour correspondre avec le premier auteur. Courriel : [falchi@istil.it](mailto:falchi@istil.it)

*Science Advances* 10 Juin 2016:

Vol. 2, no. 6, e1600377

DOI: 10.1126/sciadv.1600377

## Résumé

Les éclairages artificiels augmentent la luminosité du ciel nocturne, créant l'effet le plus visible de la pollution lumineuse - un halo artificiel. Malgré un intérêt croissant vis-à-vis de cette pollution lumineuse de la part de scientifiques de différents domaines tels que l'écologie, l'astronomie, la protection de la santé, et l'aménagement du territoire ; actuellement, une quantification de ce phénomène manque à l'échelle mondiale. Pour pallier à ce problème, nous présentons cet atlas mondial de la luminosité artificielle du ciel nocturne, calculés avec notre logiciel de propagation de la pollution lumineuse, utilisant de nouvelles données satellitaires à haute résolution et de nouvelles mesures précises de luminosité du ciel. Cet atlas montre que plus de 80% de la population mondiale et plus de 99% de la population américaine et européenne, vivent sous un ciel nocturne pollué par la lumière. Plus d'un tiers de l'humanité, 60% des Européens et près de 80% des Nord-Américains ne voient plus la Voie lactée. De plus, 23% des surfaces émergées entre 75° N et 60° S à l'échelle mondiale, connaissent des nuits polluées par la lumière. Il est en de même pour 88% des terres en Europe et pour près de la moitié aux Etats-Unis.

L'auteur tiens à remercier **Romain Sordello** et **Pierre Brunet** pour leur relecture. Toutefois, cette traduction pouvant comporter des erreurs ou omissions, avis et corrections seront les bienvenus. Contacter le traducteur : [alain.leque@wanadoo.fr](mailto:alain.leque@wanadoo.fr)

Mots-clés: pollution lumineuse, l'astronomie, protection de l'environnement

## INTRODUCTION

La pollution lumineuse est l'altération des niveaux d'éclairement naturel nocturne, causés par des sources anthropiques de lumière (1). Ces derniers sont régis naturellement par des sources célestes, principalement la Lune, les émissions atmosphériques naturelles (luminescence), les étoiles et la voie lactée et la lumière zodiacale. Pendant les nuits sans lune, la luminosité du fond d'un ciel clair, éloigné de la Voie lactée et de la lumière zodiacale, est d'environ magnitude 22 par seconde d'arc au carré ( $\text{mag/arcsec}^2$ ) dans la bande V Johnson-Cousins (2), ce qui équivaut à  $1,7 \times 10^{-4} \text{ cd/m}^2$ . La lumière artificielle diffusée dans l'atmosphère augmente la luminosité du ciel nocturne, créant l'effet négatif de la pollution lumineuse le plus facilement visible - un halo artificiel. En plus d'entraver, au sol, les observations astronomiques optiques, la luminosité artificielle du ciel nocturne représente une forte altération d'une expérience humaine fondamentale – l'opportunité, pour chaque personne, de regarder et méditer sous le ciel nocturne. Même de petites augmentations de la luminosité du ciel dégradent cette expérience. La pollution lumineuse n'est plus seulement une question importante pour les astronomes professionnels (3, 4). Bien que, dans divers domaines, les chercheurs soient maintenant intéressés par la pollution lumineuse, son niveau (magnitude) est mal connu à l'échelle mondiale car les mesures existantes sont distribuées irrégulièrement à travers le monde. Pour pallier à ce problème, nous présentons l'atlas mondial de la luminosité artificielle du ciel nocturne, qui a été obtenu avec notre logiciel dédié, de propagation de la pollution lumineuse, utilisant de nouvelles données calibrées ; à grande gamme dynamique, à haute résolution, provenant de l'Instrument Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band (DNB) – Ensemble Radiomètre Imageur Visible Infrarouge - Bande Jour / Nuit, de nouveaux capteurs à dispositif à transfert de charge (CCD) précis, mesurant la luminosité, et une nouvelle base de données des mesures effectuées avec le Sky Quality Meter (SQM).

La pollution lumineuse est l'une des formes d'altérations les plus envahissantes de l'environnement (5). Elle affecte même des sites initialement vierges, car la nuit, elle est facilement observable, à des centaines de kilomètres de sa source, dans des paysages semblant, pendant la journée, indemnes d'impacts humains (6) ; et endommageant les paysages nocturnes, y compris dans des espaces protégés, comme les parcs nationaux (par exemple, comme les dômes lumineux de Las Vegas et de Los Angeles, visibles du Parc National de la Vallée de la Mort). Dans le passé, malgré son ampleur mondiale, la pollution lumineuse a reçu relativement peu d'attention de la part des scientifiques de l'environnement. Ceci est en train de changer, comme en témoigne l'augmentation rapide du nombre de publications sur ce sujet. L'atlas que nous présentons ici est destiné à aider les chercheurs qui auraient besoin de connaître les niveaux de pollution lumineuse pour des études dans leurs domaines (par exemple, en astronomie, écologie, protection de l'environnement et économie).

## RESULTATS

### Distribution spatiale vers le haut et cartes

En utilisant la « probabilité maximale convenable » décrite dans la partie « Matériel et Méthodes », nous avons trouvé une distribution spatiale d'émission moyenne vers le haut qui décrit le mieux l'ensemble des données (la courbe rouge dans la **Figure.1**). Celle-ci ne vise pas à être considérée comme la distribution «réelle» ni comme la «meilleure» distribution spatiale d'émission vers le haut, il s'agit simplement de celle qui donne le meilleur ajustement statistique pour l'ensemble des données d'observation. D'autres facteurs que la distribution réelle de l'intensité lumineuse peuvent influencer sa forme (par exemple, la transparence atmosphérique pouvant être supérieure ou inférieure à celle prise en compte par le modèle). Cet ajustement suggère que, en plus de la distribution lambertienne résultant des réflexions de surface, l'émission vers le haut, aux petits angles, est une composante importante des émissions lumineuses des villes. Cette dernière provient probablement de luminaires mal capotés (défilés ou non défilés). Le fait que la majeure partie du flux trouvé vers le haut, soit uniquement lambertienne ne signifie pas que la lumière réfléchi soit à l'origine de la composante principale de la luminosité artificielle du ciel. En fait, comme démontré précédemment (7, 8), en dehors des villes, la luminosité du ciel est dominée par la lumière émise aux petits angles au-dessus du plan horizontal, exactement là, où les résultats donnés par la distribution spatiale d'émission vers le haut diffère le plus d'une pure distribution Lambertienne.

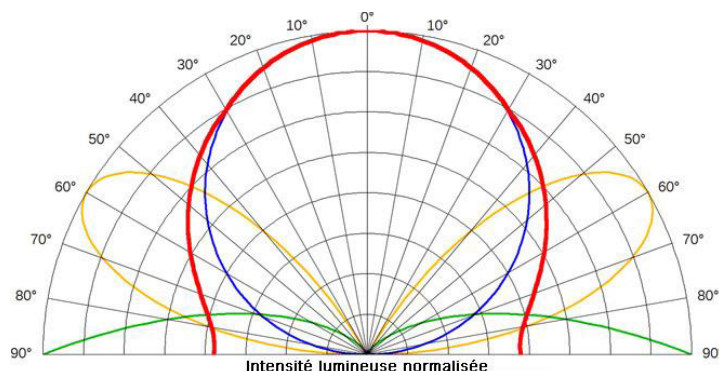
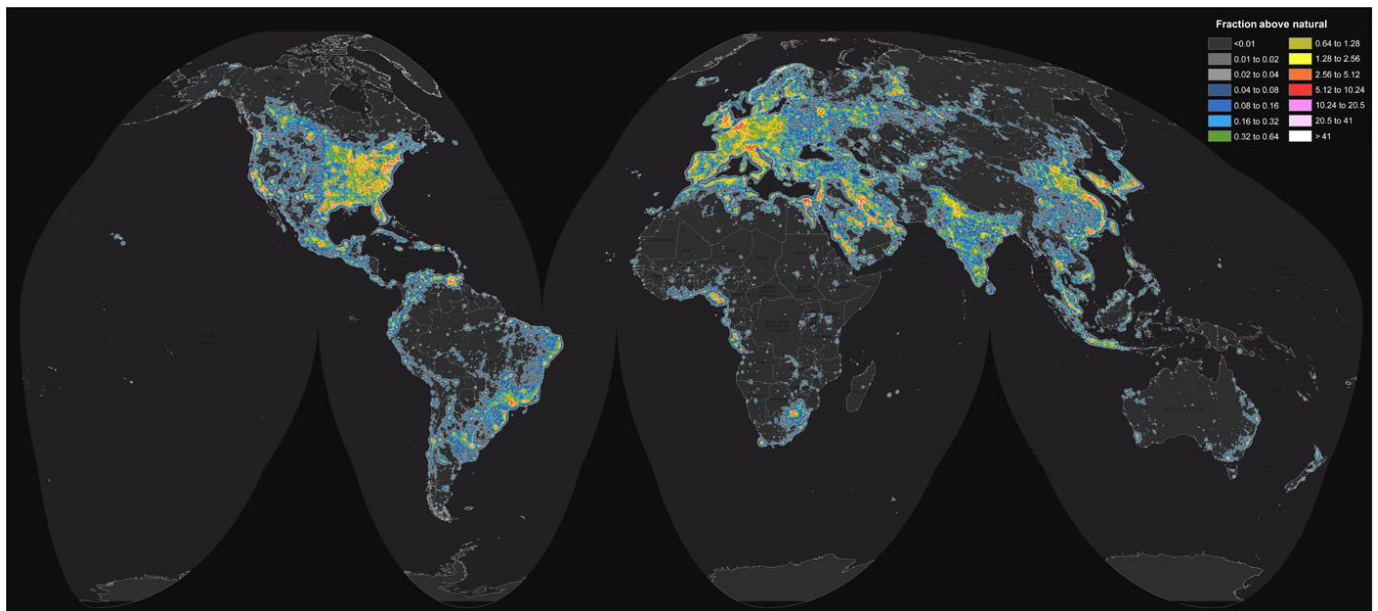


Fig. 1 Distributions spatiales des émissions vers le haut, adoptées pour le calcul des cartes.

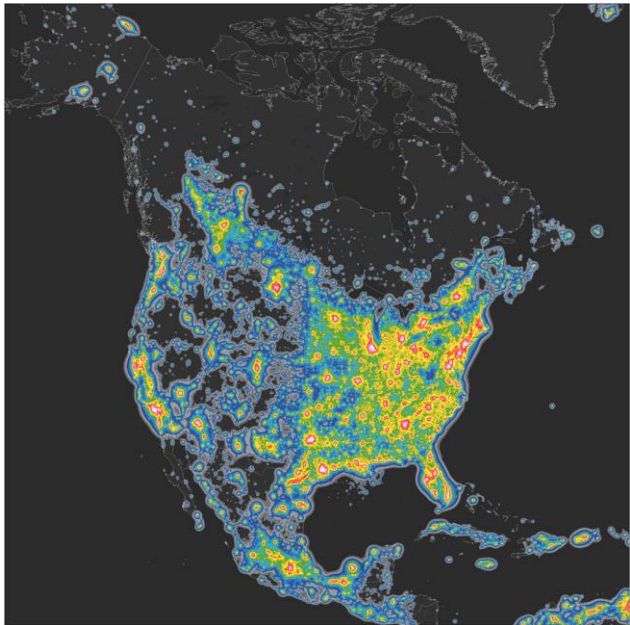
Diagramme polaire illustrant les trois distributions spatiales d'intensité lumineuse utilisées pour le calcul des trois versions de cartographie : la distribution Lambertienne avec un maximum vers le zénith (carte A ; bleu), la distribution présentant un maximum au-dessus du plan horizontal (carte B ; vert), et la distribution présentant un maximum aux élévations intermédiaires, 30° au-dessus du plan horizontal (carte C ; jaune). La courbe rouge donne la distribution globale qui en résulte.

Des cartes ont été produites pour montrer la luminosité artificielle du ciel au zénith, avec un doublement de celle-ci à chaque niveau par rapport à la luminosité naturelle du ciel (**Figure. 7 à 8**). Les cartes ont été calibrées pour correspondre à un horaire du passage du satellite, d'environ 1 heure du matin. Du fait de la diminution des éclairages artificiels au cours de la nuit, un ciel plus lumineux devrait être attendu lors d'observations faites plus tôt dans la nuit. Nous avons choisi  $22,0 \text{ mag/arcsec}^2$ , correspondant à  $174 \text{ } \mu\text{cd/m}^2$ , comme luminosité typique du fond du ciel nocturne pendant le minimum de l'activité solaire, en excluant les étoiles les plus brillantes (au-delà de la magnitude 7) et éloigné de la Voie lactée, du Gegenschein et de la lumière zodiacale. Les variations de luminescence naturelle, même au cours d'une même nuit, peuvent causer plus de la moitié d'une variation d'amplitude de la luminosité du fond du ciel sur les sites non pollués. Les mesures de la luminosité du ciel faites avec des instruments à grand champ qui intègrent la lumière provenant d'une partie substantielle du ciel (par exemple, les SQM et SQM-L), englobent la lumière des étoiles visibles à l'œil nu, ce qui augmente la luminosité du ciel détectée. Ceci est à prendre en compte dans le cas d'une comparaison avec les prédictions de l'atlas pour éviter un biais. Le **tableau 1** indique les couleurs de chaque niveau utilisé dans les cartes.



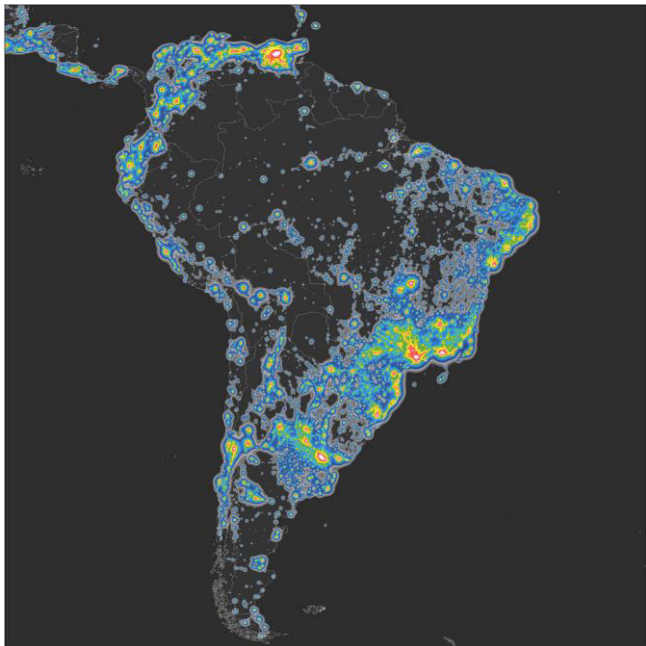
**Fig. 2 Carte mondiale de la luminosité artificielle du ciel.**

La carte montre, selon une échelle où les valeurs doublent d'une classe à l'autre, la luminosité du ciel artificiel par rapport à celle d'un ciel naturel (supposée être de 174  $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ). Le **Tableau 1** indique la signification de chaque niveau de couleur.



**Fig. 3 Carte de la luminosité artificielle du ciel de l'Amérique du Nord, selon une échelle où les valeurs doublent d'une classe à l'autre, par rapport à celle d'un ciel naturel.**

Le **Tableau 1** indique la signification de chaque niveau de couleur

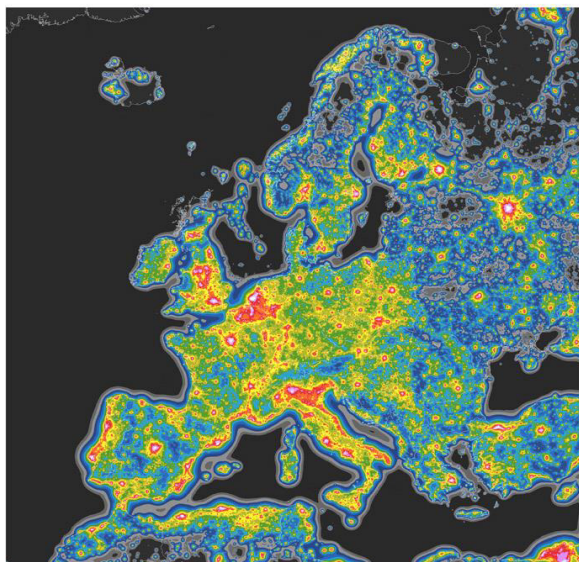


**Fig. 4 Carte de la luminosité artificielle du ciel de l'Amérique du Sud, selon une échelle où les valeurs doublent d'une classe à l'autre, par rapport à celle d'un ciel naturel.**

Le **Tableau 1** indique la signification de chaque niveau de couleur.



A



B

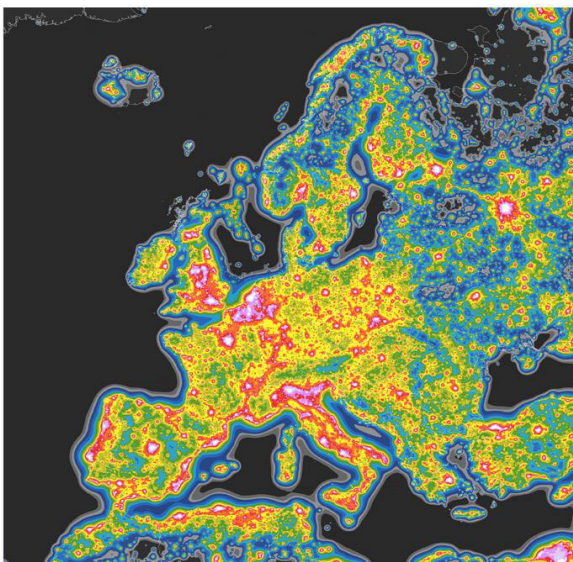


Fig. 5

Carte de la luminosité artificielle du ciel de l'Europe, selon une échelle où les valeurs doublent d'une classe à l'autre, par rapport à celle d'un ciel naturel (supposé être  $174 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ ).

(A) La carte montre la luminosité du ciel artificiel dans la Bande V, comme pour les autres cartes. (B) La carte montre les prévisions de luminosité du ciel perçu pour un œil adapté à l'obscurité, après un passage à une technologie LED ayant une Température de Couleur de  $4000^\circ\text{K}$ , sans augmenter le flux lumineux photopique des lampes actuellement installées. Le **Tableau 1** indique la signification de chaque niveau de couleur.

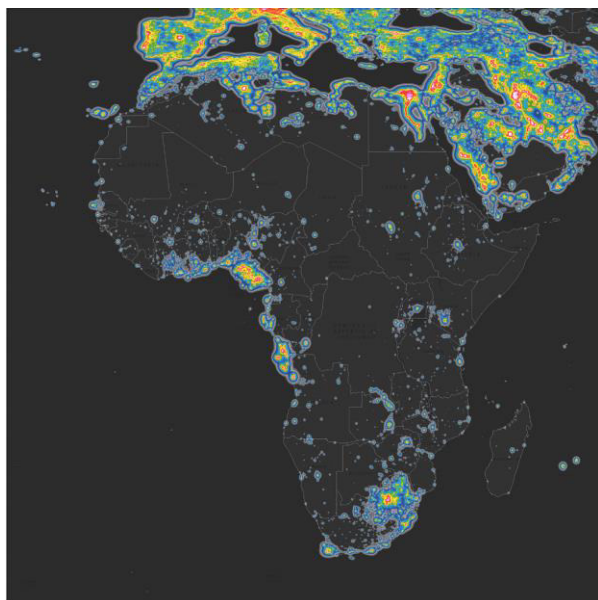


Fig. 6 Carte de la luminosité artificielle du ciel de l'Afrique, selon une échelle où les valeurs doublent d'une classe à l'autre, par rapport à celle d'un ciel naturel.

Le **Tableau 1** indique la signification de chaque niveau de couleur.

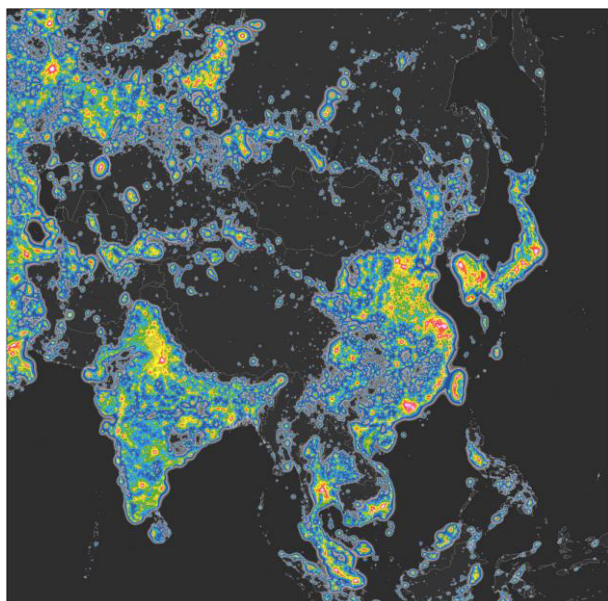
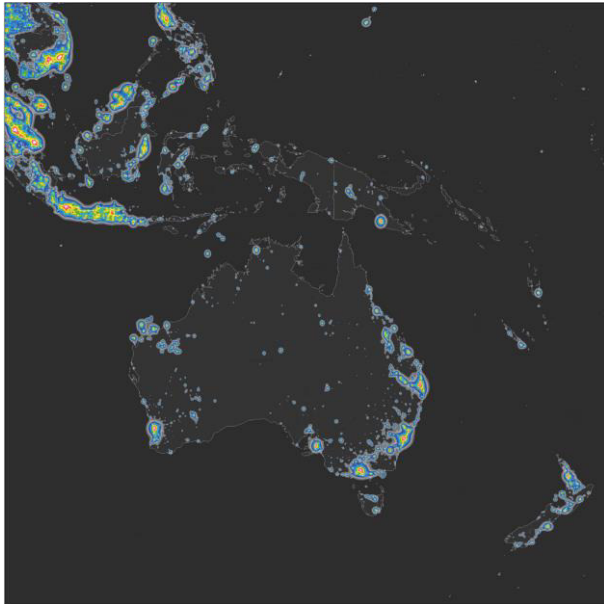


Fig. 7 Carte de la luminosité artificielle du ciel de l'Asie, selon une échelle où les valeurs doublent d'une classe à l'autre, par rapport à celle d'un ciel naturel.

Le **Tableau 1** indique la signification de chaque niveau de couleur.



**Fig. 8** Carte de la luminosité artificielle du ciel de l'Australie, de l'Indonésie et de la Nouvelle Zélande, selon une échelle où les valeurs doublent d'une classe à l'autre, par rapport à celle d'un ciel naturel.

Le **Tableau 1** II indique la signification de chaque niveau de couleur.

**Tableau 1** Code couleur des niveaux utilisé dans les cartes.

La première colonne indique le ratio entre la luminosité artificielle et la luminosité naturelle du fond du ciel (supposée être de  $174 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ ) ; la seconde colonne donne la luminosité artificielle ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ), la troisième colonne donne approximativement (en supposant un fond de ciel naturel égal à  $22 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ ) la luminosité totale ( $\text{mcd}/\text{m}^2$ ) et les quatrième et cinquième colonnes indiquent les couleurs correspondantes.

| Ratio avec la luminosité naturelle | Luminosité artificielle ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ) | Luminosité totale approximative ( $\text{mcd}/\text{m}^2$ ) | Couleur    |  |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|--|
| <0.01                              | <1.74                                                 | <0.176                                                      | Noir       |  |
| 0.01–0.02                          | 1.74–3.48                                             | 0.176–0.177                                                 | Grus noir  |  |
| 0.02–0.04                          | 3.48–6.96                                             | 0.177–0.181                                                 | Gris       |  |
| 0.04–0.08                          | 6.96–13.9                                             | 0.181–0.188                                                 | Bleu foncé |  |
| 0.08–0.16                          | 13.9–27.8                                             | 0.188–0.202                                                 | Bleu       |  |
| 0.16–0.32                          | 27.8–55.7                                             | 0.202–0.230                                                 | Bleu clair |  |
| 0.32–0.64                          | 55.7–111                                              | 0.230–0.285                                                 | Vert foncé |  |
| 0.64–1.28                          | 111–223                                               | 0.285–0.397                                                 | Vert       |  |
| 1.28–2.56                          | 223–445                                               | 0.397–0.619                                                 | Jaune      |  |
| 2.56–5.12                          | 445–890                                               | 0.619–1.065                                                 | Orange     |  |
| 5.12–10.2                          | 890–1780                                              | 1.07–1.96                                                   | Rouge      |  |
| 10.2–20.5                          | 1780–3560                                             | 1.96–3.74                                                   | Magenta    |  |
| 20.5–41                            | 3560–7130                                             | 3.74–7.30                                                   | Rose       |  |
| > 41                               | > 7130                                                | > 730                                                       | Blanc      |  |

Dans le cadre de cet atlas, nous avons fixé le niveau de luminosité artificielle pour lequel un ciel peut être considéré comme «pur/naturel», qu'avec une augmentation inférieure ou égale à 1% du fond naturel. Bien que 1% ( $1,7 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ ) soit une augmentation presque imperceptible au zénith (généralement la partie la plus sombre de la sphère céleste), elle est généralement beaucoup plus significative au plus près de l'horizon dans la direction de la, des source(s). Pour des zones protégées pour leur caractère pittoresque ou sauvage, le halo sur horizon a un impact significatif sur l'appréciation de l'isolement et de l'absence d'intrusion visuelle d'installation humaine.

Le niveau gris foncé (1 à 2%) définit le point où une attention devrait être accordée à la protection d'un site, eu égard à une augmentation future de la pollution lumineuse. Le niveau bleu (8 à 16%) indique approximativement le niveau où le ciel peut être considéré comme pollué d'un point de vue astronomique, selon la recommandation 1 de Commission 50 de l'UAI (9). L'hiver, la Voie Lactée (plus faible que son homologue d'été), ne peut être observée dans des sites cartographiés en jaune, et le niveau orange définit les zones où la Voie Lactée est masquée aussi en été. Ce niveau correspond à une luminosité totale du ciel, comprise approximativement entre 20,6 et 20,0  $\text{mag}/\text{arcsec}^2$  (0,6 à 1,1  $\text{mcd}/\text{m}^2$ ). En été, avec une telle luminosité du ciel, la Voie Lactée n'est que faiblement détectable dans le Cygne comme une petite augmentation de la luminosité du fond de ciel. Le Nuage du Sagittaire est la seule partie de la Voie lactée qui est encore visible à ce niveau de pollution tel qu'observé aux latitudes méridionales. Le rouge indique approximativement le seuil de transition, selon la Commission Internationale de l'Eclairage (10), entre la vision scotopique et la vision mésopique (1  $\text{mcd}/\text{m}^2$ ). Aussi à l'intérieur de la plage du niveau rouge, le ciel a la même luminosité qu'un ciel clair non pollué en fin de crépuscule nautique (1,4  $\text{mcd}/\text{m}^2$ ) (11). Cela signifie que, dans les sites ayant ce niveau de pollution, les gens ne vivent plus dans des conditions où ils peuvent expérimenter une nuit véritable, et voir quelques constellations & Objet astronomiques, car elle est occultée par un crépuscule artificiel.



Une analyse géographique de proximité révèle des endroits sur Terre où les habitants auraient à parcourir de très longues distances pour atteindre un site d'observation terrestre ayant une qualité du ciel suffisante, où certaines caractéristiques du ciel nocturne sont observables. A l'échelle du globe, l'endroit où la distance pour apercevoir la Voie lactée (luminosité artificielle du ciel au zénith  $< 688 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ ) est la plus longue, est situé près du Caire, en Egypte, dans la région dans le delta du Nil. Parmi les autres vastes régions où la Voie lactée n'est plus totalement visible, on retrouve la région transnationale Belgique/Pays-Bas/Allemagne (des villes de Dortmund à Bonn), la plaine de Padana dans le nord de l'Italie et le tissu urbain entre Boston et Washington dans le nord-est des États-Unis. Il y a d'autres grandes zones où la Voie lactée a disparu, la région de Londres à Liverpool/Leeds en Angleterre, et les régions aux alentours de Beijing et Hong Kong, en Chine et à Taiwan. Les personnes vivant près de Paris devront parcourir 900 km pour aller jusqu'en Corse, au centre de l'Ecosse ou dans la province de Cuenca en Espagne pour trouver de vastes territoires où le zénith est peu affecté par la pollution lumineuse (luminosité artificielle du ciel  $< 8\%$  du fond naturel). Mais même dans ces endroits, des halos significatifs seront présents près de l'horizon. Le ciel naturel préservé (luminosité artificielle du ciel  $< 1\%$  du fond naturel) le plus proche de Neuchâtel en Suisse est situé à plus de 1360 km dans le nord-ouest l'Ecosse, en Algérie ou en Ukraine (voir **Figure. 9**). Certaines îles sont plus éloignées encore d'un ciel nocturne naturel. Depuis les Bermudes, il est nécessaire de voyager sur plus de 1400 km pour trouver le site préservé le plus proche, en Nouvelle-Écosse. Les Açores constituent le territoire le plus éloigné d'un ciel nocturne naturel, avec plus de 1750 km à parcourir jusqu'au Sahara occidental.

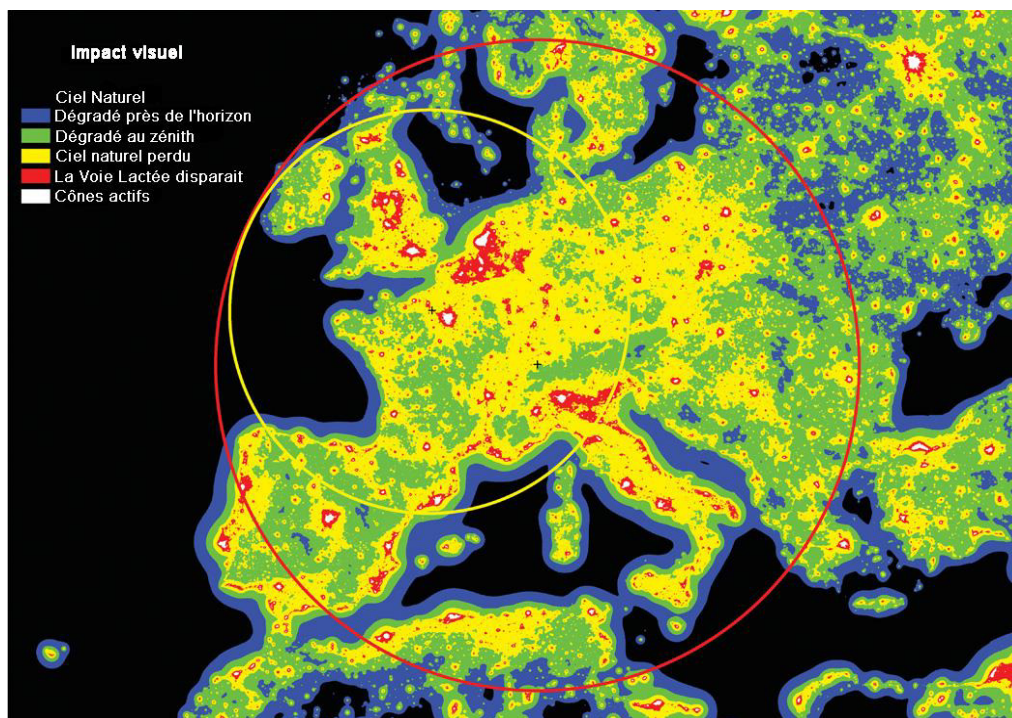
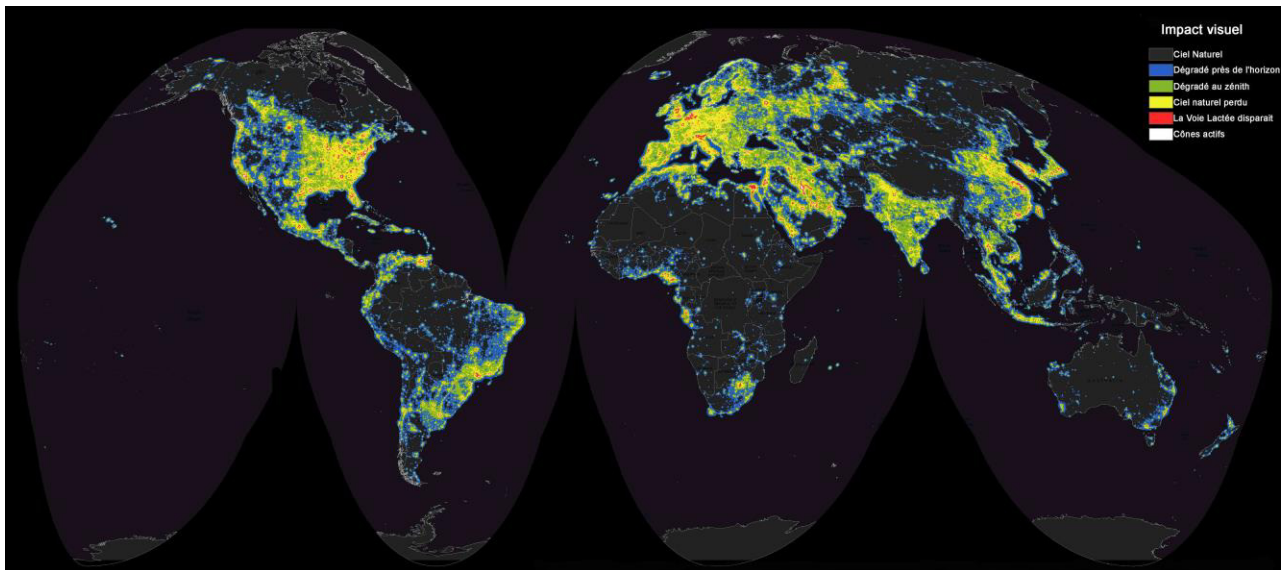


Fig. 9 Sites sur Terre le plus éloigné d'un ciel naturel, ayant un ciel au zénith non pollué.

Les niveaux de luminosité du ciel utilisés ici indiquent : jusqu'à 1% au-dessus de la luminosité naturelle ( $0 \text{ à } 1,7 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; noir) ; entre 1 et 8% au-dessus de la luminosité naturelle ( $1,7 \text{ à } 14 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; bleu) ; entre 8 et 50% au-dessus de la luminosité nocturne naturelle ( $14 \text{ à } 87 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; vert) ; de 50% et au-dessus au niveau de la luminosité naturelle où la Voie lactée n'est plus visible ( $87 \text{ à } 688 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; jaune) ; de la disparition de la Voie Lactée jusqu'au niveau de stimulation estimé des cônes ( $688 \text{ à } 3000 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; rouge) ; enfin des niveaux de luminosité nocturnes très élevés où l'adaptation à l'obscurité des yeux

## Constatations : Statistiques de la luminosité nocturne

Cet atlas montre, pour la première fois en 15 ans, l'impact de la pollution générée par les éclairages artificiels nocturnes sur la population mondiale. La **Figure. 10** présente les données de l'atlas mondial avec les niveaux utilisés pour calculer statistiquement les impacts visuels des différents niveaux de pollution lumineuse.



**Fig. 10. Carte de l'impact visuel de la pollution lumineuse sur le ciel nocturne.**

Les niveaux de luminosité du ciel sont ceux utilisés dans les tableaux et indiquent : jusqu'à 1% au-dessus de la luminosité naturelle ( $0 \text{ à } 1,7 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; noir) ; entre 1 et 8% au-dessus de la luminosité naturelle ( $1,7 \text{ à } 14 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; bleu) ; entre 8 et 50% au-dessus de la luminosité naturelle nocturne ( $14\text{-}87 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; vert) ; de 50% et au-dessus du niveau de la luminosité naturelle sous lequel la Voie lactée n'est plus visible ( $87\text{-}688 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; jaune) ; de la disparition de Voie Lactée jusqu'au niveau de stimulation estimé des cônes ( $688\text{-}3000 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; rouge) ; des niveaux de luminosité nocturnes très élevés où l'adaptation à l'obscurité des yeux humains est impossible ( $> 3000 \mu\text{cd}/\text{m}^2$  ; blanc).

Nous avons constaté qu'environ 83% de la population mondiale et plus de 99% des populations américaines et européennes vivent sous un ciel pollué par la lumière artificielle (c'est-à-dire où la luminosité artificielle du ciel au zénith est  $> 14 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ ). En raison de la pollution lumineuse, la Voie lactée n'est pas visible par plus d'un tiers de l'humanité, par 60% des Européens et par près de 80% des Nord-Américains. En outre, 23% des surfaces émergées entre  $75^\circ \text{ N}$  et  $60^\circ \text{ S}$  à l'échelle du globe connaissent des nuits polluées par la lumière. Il en est de même pour 88% des terres en Europe, et pour presque la moitié des terres aux Etats-Unis.

Les pays dont les populations sont les moins touchées par la pollution lumineuse sont le Tchad, la République centrafricaine et Madagascar, avec plus de trois quarts des habitants vivant dans des conditions de ciel naturel préservé. Les pays et territoires ayant les plus grandes zones non polluées sont le Groenland (seulement 0,12% de sa superficie n'a plus de ciel nocturne naturel), la République centrafricaine (0,29%), Niue (0,45%), la Somalie (1,2%) et la Mauritanie (1,4%).

Au contraire, le pays le plus pollué par la lumière est Singapour, où l'ensemble de la population vit sous un ciel si lumineux, qui fait qu'en vision nocturne, l'œil ne peut pas entièrement s'adapter à l'obscurité. Les autres populations rencontrant ce niveau de pollution lumineuse sont celles du Koweït (98%), du Qatar (97%), des Emirats Arabes Unis (93%), de l'Arabie Saoudite (83%), de la Corée du Sud (66%), d'Israël (61%), de l'Argentine (58%), de la Libye (53%), et de Trinité-et-Tobago (50%) ; tous ces pays ont plus de la moitié de leurs habitants vivant sous un ciel très lumineux.

La possibilité de voir la Voie lactée depuis sa maison est exclue pour tous les habitants de Singapour, de Saint-Marin, du Koweït, du Qatar et de Malte et pour 99%, 98% et 97% de la population des Emirats Arabes Unis, d'Israël et d'Egypte, respectivement. Les pays ayant la plus grande partie de leur territoire où la Voie lactée est masquée par la pollution lumineuse sont : Singapour et San Marin (100%), Malte (89%), la Cisjordanie (61%), le Qatar (55%), la Belgique et le Koweït (51%), Trinité-et-Tobago et les Pays-Bas (43%) et enfin Israël (42%).

Parmi les pays du G20, l'Arabie Saoudite et la Corée du Sud ont le pourcentage le plus élevé de leur population exposée à un ciel très lumineux alors que l'Allemagne est le pays où ce pourcentage est le plus faible selon la même mesure. Les territoires de l'Italie et de la Corée du Sud sont parmi les plus pollués des pays du G20 alors que l'Australie est la moins polluée. Rappelons que les résultats présentés ici sont calculés pour correspondre à des observations à 1 heure du matin, lors des passages supérieurs du satellite, alors que la situation en début de soirée est encore pire.

La **Figure 11** montre les statistiques concernant la population des pays du G20. La **Figure 12** montre celles concernant les surfaces des pays du G20. Les **Figures 13** et **14** montrent les statistiques démographiques pour les 20 pays les moins pollués et les 20 pays les plus pollués. Les résultats complets de cette analyse sont présentés dans le **Tableau 2**.

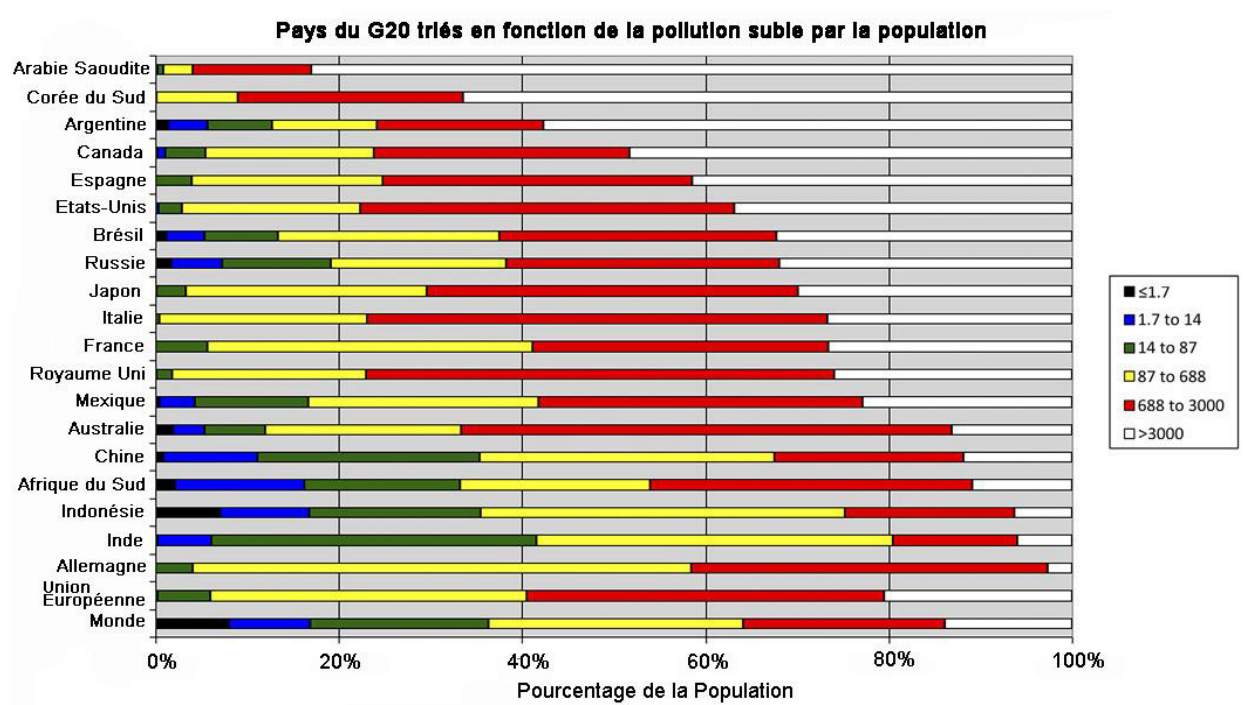


Fig. 11. Les pays du G20 triés en fonction de la pollution lumineuse subie par la population.

Le graphique montre les pays du groupe G20 dont la population vit sous un ciel pollué spécifiquement par la luminosité artificielle du ciel. Les codes de couleur, sur la droite, indiquent le niveau de pollution ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ).

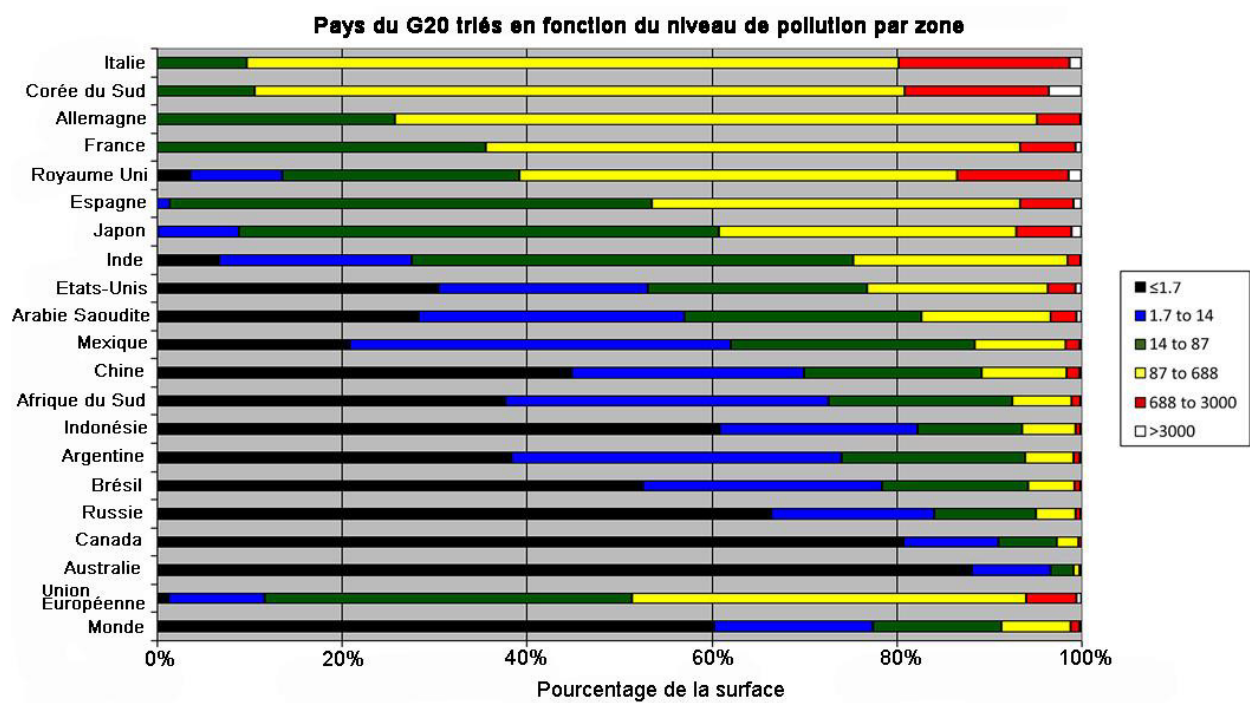
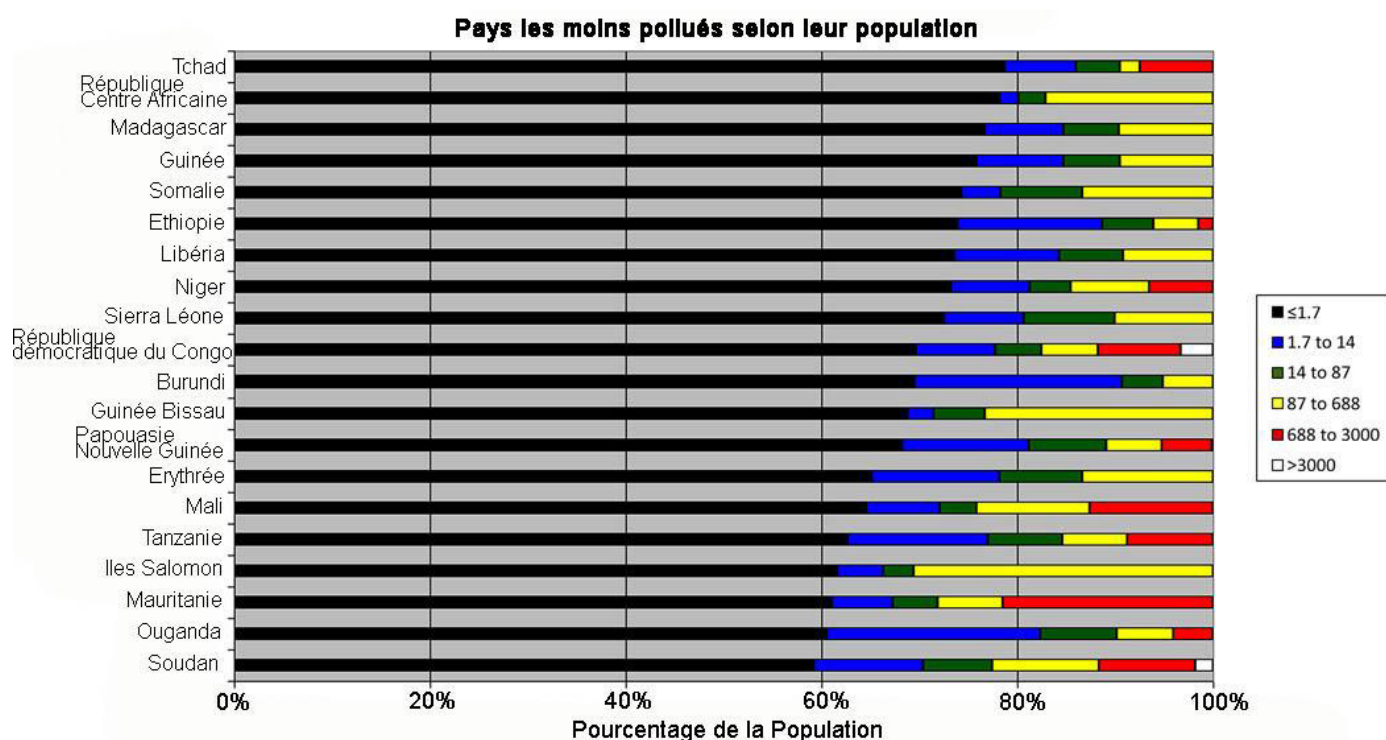


Fig. 12. Les pays du G20 triés en fonction du niveau de pollution par zone.

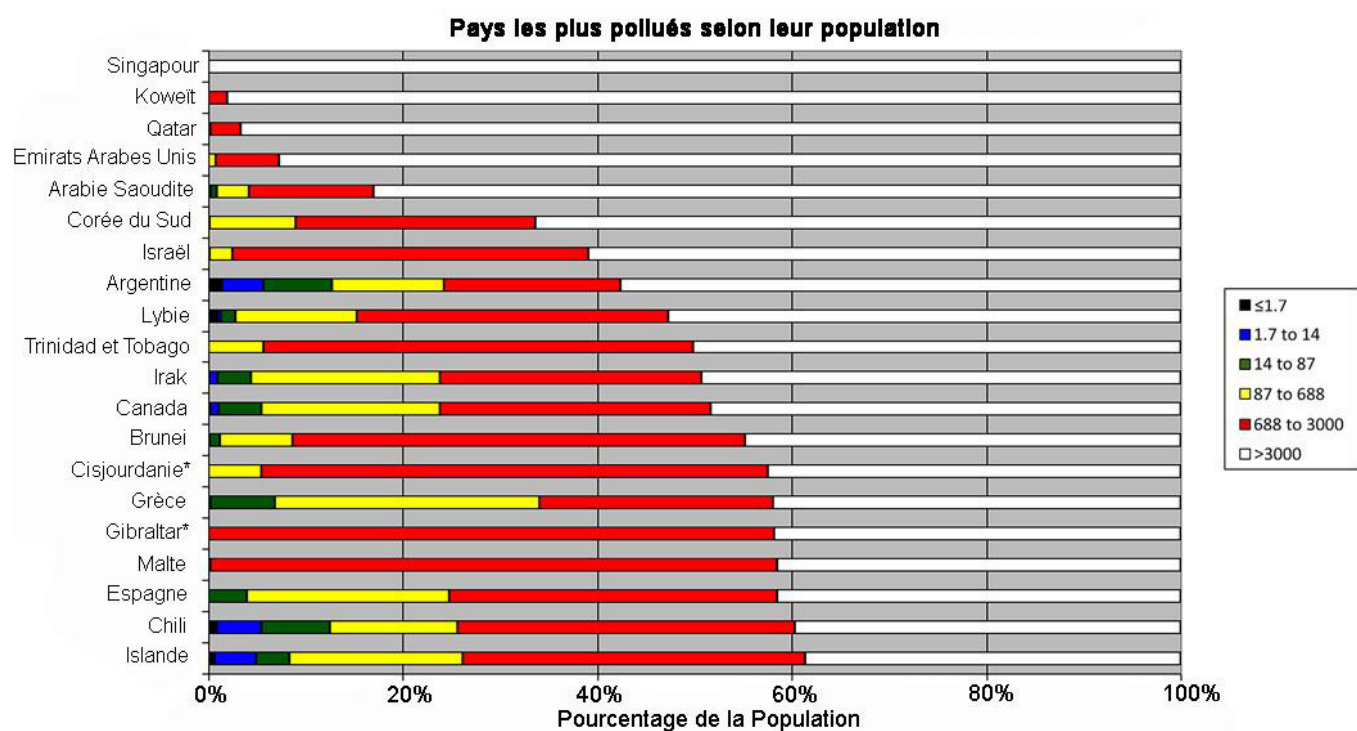
Le graphique montre les pays du groupe G20 dont la population vit sous un ciel pollué spécifiquement par la luminosité artificielle du ciel. Les pays sont classés en utilisant les surfaces soumises à trois niveaux de pollution les plus élevés (qui sont ici, jaune, rouge et blanc). Différentes classes peuvent être obtenues en choisissant différents niveaux de pollution. Les codes de couleur, sur la droite, indiquent le niveau de pollution ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ).





**Fig. 13. Les 20 pays les moins pollués.**

Les pays où les populations sont le moins exposées à la pollution lumineuse. Les codes de couleur, sur la droite, indiquent le niveau de pollution ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ).



**Fig. 14. Les 20 pays les plus pollués.**

Les pays où les populations sont les plus exposées à la pollution lumineuse. Les codes de couleur, sur la droite, indiquent le niveau de pollution ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ).

| Pays                     | luminosité (μcd/m <sup>2</sup> ) |       |       |       |      |       |             |       |       |       |      |       |
|--------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------------|-------|-------|-------|------|-------|
|                          | Population (%)                   |       |       |       |      |       | Surface (%) |       |       |       |      |       |
|                          | 1.7                              | >1.7  | >14   | >87   | >688 | >3000 | 1.7         | >1.7  | >14   | >87   | >688 | >3000 |
| Afghanistan              | 39.1                             | 60.9  | 37.2  | 26.5  | 11.6 | 79.4  | 20.6        | 4.0   | 0.8   | 0.0   | 0.0  | 20.6  |
| Afrique du Sud           | 2.2                              | 97.8  | 83.7  | 66.8  | 46.1 | 10.9  | 37.7        | 62.3  | 27.4  | 7.5   | 1.1  | 0.1   |
| Albanie                  | 0.0                              | 100.0 | 98.5  | 75.6  | 37.1 | 10.3  | 0.0         | 100.0 | 87.5  | 23.8  | 1.7  | 0.0   |
| Allemagne                | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 96.0  | 41.6 | 2.7   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 74.2  | 4.8  | 0.1   |
| Algérie                  | 0.3                              | 99.7  | 98.5  | 91.9  | 52.1 | 19.2  | 66.4        | 33.6  | 19.3  | 8.7   | 1.1  | 0.2   |
| Andorre                  | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 43.6 | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 98.1  | 1.5  | 0.0   |
| Angola                   | 55.2                             | 44.8  | 33.2  | 27.5  | 15.2 | 7.0   | 88.5        | 11.5  | 2.9   | 0.8   | 0.2  | 0.0   |
| Anguilla*                | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 99.3  | 0.0  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 95.5  | 0.0  | 0.0   |
| Antigua-et-Barbuda       | 1.4                              | 98.6  | 94.3  | 87.3  | 75.8 | 57.7  | 38.4        | 61.6  | 26.0  | 6.1   | 0.9  | 0.2   |
| Arménie                  | 0.0                              | 100.0 | 86.3  | 57.9  | 31.3 | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 35.1  | 6.2   | 0.3  | 0.0   |
| Antilles Néerlandaises * | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 99.2  | 93.5 | 0.7   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 79.6  | 30.0 | 1.7   |
| Aruba*                   | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 68.3 | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 23.9 | 0.0   |
| Australie                | 2.0                              | 98.0  | 94.7  | 88.0  | 66.7 | 13.1  | 88.1        | 11.9  | 3.4   | 0.9   | 0.2  | 0.0   |
| Arabie Saoudite          | 0.0                              | 100.0 | 99.8  | 99.1  | 95.9 | 83.0  | 28.3        | 71.7  | 43.0  | 17.3  | 3.3  | 0.6   |
| Autriche                 | 0.0                              | 100.0 | 99.9  | 88.7  | 35.7 | 10.3  | 0.0         | 100.0 | 97.8  | 40.0  | 1.8  | 0.1   |
| Azerbaïdjan              | 0.0                              | 100.0 | 95.2  | 71.2  | 34.6 | 15.3  | 18.6        | 81.4  | 51.1  | 13.0  | 1.3  | 0.1   |
| Bande de Gaza*           | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 95.1 | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 68.1 | 0.0   |
| Bangladesh               | 1.1                              | 98.9  | 79.2  | 32.2  | 10.4 | 0.0   | 5.3         | 94.7  | 60.7  | 11.5  | 0.6  | 0.0   |
| Barbades                 | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 6.0  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 99.7  | 1.4  | 0.0   |
| Belarus                  | 0.0                              | 100.0 | 92.7  | 74.9  | 48.5 | 12.0  | 0.0         | 100.0 | 63.2  | 10.3  | 0.9  | 0.1   |
| Belgique                 | 0.0                              | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 86.8 | 22.2  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 51.1 | 2.6   |
| Belize                   | 5.6                              | 94.4  | 77.8  | 55.9  | 4.2  | 0.0   | 33.2        | 66.8  | 19.7  | 3.0   | 0.0  | 0.0   |
| Benin                    | 34.4                             | 65.6  | 44.1  | 27.8  | 6.6  | 0.0   | 84.5        | 15.5  | 3.8   | 1.0   | 0.0  | 0.0   |
| Bhoutan                  | 12.3                             | 87.7  | 51.0  | 20.7  | 0.0  | 0.0   | 43.6        | 56.4  | 8.6   | 0.4   | 0.0  | 0.0   |
| Bolivie                  | 13.0                             | 87.0  | 72.5  | 63.4  | 48.9 | 12.0  | 77.2        | 22.8  | 5.5   | 1.2   | 0.1  | 0.0   |
| Bosnie Herzégovine       | 0.0                              | 100.0 | 98.9  | 79.0  | 26.2 | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 88.7  | 26.0  | 0.7  | 0.0   |
| Botswana                 | 22.7                             | 77.3  | 59.3  | 43.0  | 11.5 | 0.0   | 89.6        | 10.4  | 2.2   | 0.4   | 0.0  | 0.0   |
| Brésil                   | 1.2                              | 98.8  | 94.7  | 86.7  | 62.5 | 32.3  | 52.6        | 47.4  | 21.6  | 5.7   | 0.7  | 0.1   |
| Brunei                   | 0.0                              | 100.0 | 99.9  | 98.8  | 91.3 | 44.9  | 0.0         | 100.0 | 76.4  | 44.8  | 12.5 | 1.6   |
| Bulgarie                 | 0.0                              | 100.0 | 99.2  | 77.3  | 37.0 | 4.9   | 0.0         | 100.0 | 94.6  | 19.5  | 0.9  | 0.0   |
| Burkina Faso             | 59.2                             | 40.8  | 23.4  | 16.9  | 10.9 | 0.0   | 84.5        | 15.5  | 2.7   | 0.5   | 0.1  | 0.0   |
| Burundi                  | 69.5                             | 30.5  | 9.3   | 5.2   | 0.0  | 0.0   | 82.8        | 17.2  | 1.9   | 0.3   | 0.0  | 0.0   |
| Cambodge                 | 30.0                             | 70.0  | 30.9  | 17.2  | 9.8  | 0.0   | 72.4        | 27.6  | 4.4   | 0.8   | 0.1  | 0.0   |
| Cameroun                 | 44.6                             | 55.4  | 42.1  | 29.3  | 19.9 | 0.0   |             |       |       |       |      |       |

Suite du tableau en page suivante \*Territoires non indépendants.

| Tableau 2 Pourcentage de la population et de la surface impactée par la luminosité artificielle du ciel ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ). Partie deux |                                          |       |       |       |       |       |             |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pays                                                                                                                                               | luminosité ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ) |       |       |       |       |       |             |       |       |       |       |       |
|                                                                                                                                                    | Population (%)                           |       |       |       |       |       | Surface (%) |       |       |       |       |       |
|                                                                                                                                                    | 1.7                                      | >1.7  | >14   | >87   | >688  | >3000 | 1.7         | >1.7  | >14   | >87   | >688  | >3000 |
| Gabon                                                                                                                                              | 22.0                                     | 78.0  | 69.4  | 56.9  | 38.7  | 0.2   | 77.5        | 22.5  | 7.9   | 2.0   | 0.3   | 0.0   |
| Gambie                                                                                                                                             | 36.1                                     | 63.9  | 52.8  | 43.6  | 0.0   | 0.0   | 77.2        | 22.8  | 6.7   | 2.6   | 0.0   | 0.0   |
| Géorgie                                                                                                                                            | 0.0                                      | 100.0 | 92.2  | 63.6  | 36.7  | 4.5   | 0.0         | 100.0 | 49.8  | 10.8  | 0.8   | 0.0   |
| Ghana                                                                                                                                              | 15.5                                     | 84.5  | 60.6  | 37.1  | 21.4  | 0.4   | 51.5        | 48.5  | 16.3  | 3.4   | 0.5   | 0.0   |
| Gibraltar*                                                                                                                                         | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 41.9  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 28.6  |
| Grèce                                                                                                                                              | 0.0                                      | 100.0 | 99.8  | 93.2  | 66.0  | 41.9  | 0.0         | 100.0 | 96.3  | 40.1  | 3.0   | 0.5   |
| Groenland*                                                                                                                                         | 13.3                                     | 86.7  | 86.6  | 78.1  | 3.9   | 0.0   | 99.9        | 0.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| Grenade                                                                                                                                            | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 76.3  | 0.0   | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 39.8  | 0.0   | 0.0   |
| Guadeloupe*                                                                                                                                        | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 99.7  | 60.2  | 1.7   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 87.5  | 11.3  | 0.1   |
| Guam (Ile de)*                                                                                                                                     | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 82.9  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 95.8  | 27.4  | 0.0   |
| Guatemala                                                                                                                                          | 2.2                                      | 97.8  | 84.8  | 46.3  | 20.2  | 0.5   | 25.4        | 74.6  | 38.9  | 7.2   | 0.6   | 0.0   |
| Guernesey*                                                                                                                                         | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 91.1  | 0.0   | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 68.7  | 0.0   | 0.0   |
| Guinée                                                                                                                                             | 75.8                                     | 24.2  | 15.3  | 9.6   | 0.0   | 0.0   | 95.1        | 4.9   | 0.8   | 0.2   | 0.0   | 0.0   |
| Guinée (ex Française)*                                                                                                                             | 7.8                                      | 92.2  | 88.4  | 77.9  | 36.7  | 0.0   | 88.3        | 11.7  | 2.9   | 0.7   | 0.1   | 0.0   |
| Guinée-Bissau                                                                                                                                      | 68.7                                     | 31.3  | 28.5  | 23.3  | 0.0   | 0.0   | 97.5        | 2.5   | 0.6   | 0.1   | 0.0   | 0.0   |
| Guinée Equatoriale                                                                                                                                 | 17.2                                     | 82.8  | 54.2  | 39.1  | 20.0  | 0.0   | 20.4        | 79.6  | 22.3  | 3.6   | 0.3   | 0.0   |
| Guyana                                                                                                                                             | 26.3                                     | 73.7  | 55.5  | 43.5  | 5.8   | 0.0   | 94.3        | 5.7   | 1.2   | 0.2   | 0.0   | 0.0   |
| Haïti                                                                                                                                              | 28.1                                     | 71.9  | 41.1  | 30.7  | 19.2  | 0.0   | 43.5        | 56.5  | 12.6  | 2.5   | 0.3   | 0.0   |
| Hollande                                                                                                                                           | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 81.2  | 26.2  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 99.4  | 42.5  | 7.2   |
| Honduras                                                                                                                                           | 2.1                                      | 97.9  | 78.5  | 51.2  | 33.2  | 2.2   | 28.9        | 71.1  | 34.2  | 6.0   | 0.5   | 0.0   |
| Hongrie                                                                                                                                            | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 86.0  | 38.5  | 9.8   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 41.1  | 2.1   | 0.2   |
| Islande                                                                                                                                            | 0.7                                      | 99.3  | 95.0  | 91.6  | 73.8  | 38.7  | 36.0        | 64.0  | 24.4  | 7.6   | 0.6   | 0.1   |
| Inde                                                                                                                                               | 0.2                                      | 99.8  | 93.9  | 58.5  | 19.5  | 5.9   | 6.8         | 93.2  | 72.5  | 24.7  | 1.5   | 0.1   |
| Indonésie                                                                                                                                          | 7.0                                      | 93.0  | 83.2  | 64.5  | 24.8  | 6.3   | 60.9        | 39.1  | 17.7  | 6.4   | 0.6   | 0.1   |
| Iran                                                                                                                                               | 0.2                                      | 99.8  | 97.9  | 88.5  | 64.0  | 17.1  | 17.0        | 83.0  | 55.5  | 18.1  | 2.6   | 0.3   |
| Iraq                                                                                                                                               | 0.1                                      | 99.9  | 99.1  | 95.6  | 76.2  | 49.4  | 28.7        | 71.3  | 53.7  | 33.2  | 9.0   | 2.5   |
| Irlande                                                                                                                                            | 0.0                                      | 100.0 | 99.6  | 83.9  | 45.2  | 18.5  | 0.0         | 100.0 | 94.6  | 39.4  | 2.0   | 0.3   |
| Ile de Man*                                                                                                                                        | 0.0                                      | 100.0 | 99.8  | 77.4  | 42.7  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 97.8  | 31.5  | 2.8   | 0.0   |
| Iles Caïmans*                                                                                                                                      | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 99.9  | 67.6  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 96.9  | 14.0  | 0.0   |
| Îles Christmas*                                                                                                                                    | 0.0                                      | 100.0 | 99.9  | 74.3  | 0.0   | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 49.1  | 6.9   | 0.0   | 0.0   |
| Iles Cocos *                                                                                                                                       | 100.0                                    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 100.0       | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| Îles Cook*                                                                                                                                         | 0.0                                      | 100.0 | 85.4  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 34.7  | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| Îles Féroé*                                                                                                                                        | 0.0                                      | 100.0 | 96.5  | 74.5  | 12.6  | 0.0   | 0.1         | 99.9  | 84.3  | 21.5  | 0.3   | 0.0   |
| Îles Falkland (malouines)*                                                                                                                         | 17.6                                     | 82.4  | 80.2  | 67.8  | 0.0   | 0.0   | 88.7        | 11.3  | 1.8   | 0.2   | 0.0   | 0.0   |
| Îles Mariannes du nord*                                                                                                                            | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 0.0   | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 0.0   | 0.0   |
| Îles Midway*                                                                                                                                       | 100.0                                    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 100.0       | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| Îles Norfolk*                                                                                                                                      | 100.0                                    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 100.0       | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| Îles Salomon                                                                                                                                       | 61.6                                     | 38.4  | 33.7  | 30.6  | 0.0   | 0.0   | 94.3        | 5.7   | 1.2   | 0.2   | 0.0   | 0.0   |
| Îles Vierges britannique*                                                                                                                          | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 0.0   | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 0.0   | 0.0   |
| Îles vierges*                                                                                                                                      | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 99.9  | 75.9  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 99.1  | 37.2  | 0.0   |
| Israël                                                                                                                                             | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 99.9  | 97.6  | 61.0  | 0.0         | 100.0 | 98.2  | 76.3  | 41.9  | 8.1   |
| Italie                                                                                                                                             | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 99.6  | 76.9  | 26.7  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 90.3  | 19.7  | 1.3   |
| Jamaïque                                                                                                                                           | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 86.0  | 47.2  | 4.1   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 41.7  | 2.9   | 0.1   |
| Japon                                                                                                                                              | 0.0                                      | 100.0 | 99.9  | 96.7  | 70.4  | 29.9  | 0.1         | 99.9  | 91.1  | 39.2  | 7.1   | 1.0   |
| Jersey*                                                                                                                                            | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 98.9  | 35.8  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 91.5  | 6.5   | 0.0   |
| Jordanie                                                                                                                                           | 0.1                                      | 99.9  | 99.7  | 98.8  | 80.5  | 24.7  | 13.6        | 86.4  | 52.0  | 22.2  | 4.2   | 0.2   |
| Kazakhstan                                                                                                                                         | 7.7                                      | 92.3  | 80.5  | 66.0  | 45.0  | 12.3  | 60.9        | 39.1  | 11.3  | 2.9   | 0.5   | 0.1   |
| Kenya                                                                                                                                              | 34.9                                     | 65.1  | 31.6  | 18.3  | 9.1   | 0.0   | 85.2        | 14.8  | 3.3   | 0.7   | 0.1   | 0.0   |
| Koweït                                                                                                                                             | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 98.1  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 92.0  | 50.9  | 11.5  |
| Kirghizistan                                                                                                                                       | 1.8                                      | 98.2  | 88.8  | 60.5  | 18.6  | 0.0   | 35.9        | 64.1  | 19.3  | 3.6   | 0.1   | 0.0   |
| Laos                                                                                                                                               | 41.0                                     | 59.0  | 35.7  | 20.1  | 8.3   | 0.0   | 73.7        | 26.3  | 5.0   | 1.0   | 0.1   | 0.0   |
| Lettonie                                                                                                                                           | 0.0                                      | 100.0 | 89.2  | 71.9  | 46.8  | 21.2  | 0.0         | 100.0 | 48.3  | 9.2   | 1.0   | 0.1   |
| Liban                                                                                                                                              | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 99.6  | 63.0  | 28.4  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 88.5  | 18.3  | 1.7   |
| Lesotho                                                                                                                                            | 18.1                                     | 81.9  | 45.9  | 21.8  | 0.0   | 0.0   | 45.2        | 54.8  | 9.2   | 1.0   | 0.0   | 0.0   |
| Liberia                                                                                                                                            | 73.6                                     | 26.4  | 15.7  | 9.2   | 0.0   | 0.0   | 95.1        | 4.9   | 0.9   | 0.1   | 0.0   | 0.0   |
| Libye                                                                                                                                              | 0.9                                      | 99.1  | 98.7  | 97.3  | 84.7  | 52.7  | 71.1        | 28.9  | 12.4  | 4.1   | 0.7   | 0.1   |
| Liechtenstein                                                                                                                                      | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 0.0   | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 93.7  | 0.0   | 0.0   |
| Lituanie                                                                                                                                           | 0.0                                      | 100.0 | 93.0  | 66.7  | 41.9  | 7.8   | 0.0         | 100.0 | 72.0  | 11.7  | 1.0   | 0.0   |
| Luxembourg                                                                                                                                         | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 60.1  | 6.9   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 18.9  | 0.2   |
| Macédoine                                                                                                                                          | 0.0                                      | 100.0 | 100.0 | 84.2  | 42.4  | 10.8  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 23.4  | 1.4   | 0.1   |
| Madagascar                                                                                                                                         | 76.7                                     | 23.3  | 15.3  | 9.6   | 0.0   | 0.0   | 97.4        | 2.6   | 0.5   | 0.1   | 0.0   | 0.0   |
| Malawi                                                                                                                                             | 29.7                                     | 70.3  | 27.9  | 13.4  | 0.7   | 0.0   | 62.3        | 37.7  | 6.5   | 1.1   | 0.0   | 0.0   |

Suite du tableau en page suivante \*Territoires non indépendants.





| Tableau 2 Pourcentage de la population et de la surface impactée par la luminosité artificielle du ciel ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ ). Partie Quatre |                |       |       |       |      |       |             |       |       |      |      |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|------|-------|-------------|-------|-------|------|------|-------|
| luminosité ( $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ )                                                                                                             |                |       |       |       |      |       |             |       |       |      |      |       |
| Pays                                                                                                                                                 | Population (%) |       |       |       |      |       | Surface (%) |       |       |      |      |       |
|                                                                                                                                                      | 1.7            | >1.7  | >14   | >87   | >688 | >3000 | 1.7         | >1.7  | >14   | >87  | >688 | >3000 |
| St. Lucie                                                                                                                                            | 0.0            | 100.0 | 100.0 | 96.7  | 44.2 | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 63.1 | 1.8  | 0.0   |
| St. Pierre and Miquelon*                                                                                                                             | 3.7            | 96.3  | 48.1  | 48.1  | 0.0  | 0.0   | 26.2        | 73.8  | 4.3   | 0.4  | 0.0  | 0.0   |
| Soudan                                                                                                                                               | 59.3           | 40.7  | 29.6  | 22.5  | 11.6 | 1.9   | 93.9        | 6.1   | 1.6   | 0.4  | 0.1  | 0.0   |
| Suriname                                                                                                                                             | 10.8           | 89.2  | 85.4  | 77.6  | 51.5 | 7.1   | 87.0        | 13.0  | 3.7   | 1.1  | 0.1  | 0.0   |
| Swaziland                                                                                                                                            | 0.0            | 100.0 | 76.3  | 33.0  | 9.8  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 64.5  | 8.3  | 0.3  | 0.0   |
| Suède                                                                                                                                                | 0.0            | 100.0 | 99.9  | 96.7  | 62.0 | 25.7  | 5.6         | 94.4  | 60.3  | 21.4 | 1.6  | 0.2   |
| Suisse                                                                                                                                               | 0.0            | 100.0 | 100.0 | 96.9  | 34.0 | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 57.9 | 2.6  | 0.0   |
| Syrie                                                                                                                                                | 0.4            | 99.6  | 91.2  | 68.5  | 21.5 | 1.3   | 23.3        | 76.7  | 38.2  | 12.4 | 0.4  | 0.0   |
| Tadjikistan                                                                                                                                          | 3.8            | 96.2  | 87.8  | 55.9  | 14.1 | 0.0   | 57.5        | 42.5  | 19.4  | 3.1  | 0.1  | 0.0   |
| Tanzanie                                                                                                                                             | 62.7           | 37.3  | 23.0  | 15.4  | 8.8  | 0.0   | 92.5        | 7.5   | 1.3   | 0.2  | 0.0  | 0.0   |
| Tchad                                                                                                                                                | 78.7           | 21.3  | 14.0  | 9.5   | 7.5  | 0.0   | 98.2        | 1.8   | 0.5   | 0.1  | 0.0  | 0.0   |
| Thaïlande                                                                                                                                            | 0.2            | 99.8  | 92.5  | 61.5  | 32.3 | 16.3  | 4.4         | 95.6  | 64.2  | 18.0 | 2.4  | 0.3   |
| Timor oriental                                                                                                                                       | 30.7           | 69.3  | 30.8  | 15.2  | 4.4  | 0.0   | 57.3        | 42.7  | 6.7   | 1.0  | 0.1  | 0.0   |
| Togo                                                                                                                                                 | 35.8           | 64.2  | 48.0  | 30.8  | 22.7 | 0.0   | 76.7        | 23.3  | 6.2   | 1.4  | 0.3  | 0.0   |
| Tokelau (les îles de)*                                                                                                                               | 100.0          | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 100.0       | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0   |
| Tonga                                                                                                                                                | 0.0            | 100.0 | 98.4  | 66.5  | 0.0  | 0.0   | 0.0         | 100.0 | 79.9  | 13.0 | 0.0  | 0.0   |
| Trinitad et Tobago                                                                                                                                   | 0.0            | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 94.3 | 50.2  | 0.0         | 100.0 | 100.0 | 96.6 | 43.5 | 5.2   |
| Tunisie                                                                                                                                              | 0.0            | 100.0 | 99.4  | 80.4  | 48.5 | 16.5  | 9.8         | 90.2  | 61.6  | 17.2 | 1.8  | 0.2   |
| Turquie                                                                                                                                              | 0.0            | 100.0 | 97.8  | 77.7  | 49.9 | 24.3  | 0.0         | 100.0 | 87.4  | 25.7 | 2.2  | 0.3   |
| Turkménistan                                                                                                                                         | 1.3            | 98.7  | 95.9  | 87.5  | 47.3 | 19.5  | 46.0        | 54.0  | 25.0  | 8.5  | 1.3  | 0.2   |
| Union Européenne                                                                                                                                     | 0.0            | 100.0 | 99.8  | 94.0  | 59.5 | 20.5  | 1.3         | 98.7  | 88.4  | 48.7 | 6.0  | 0.6   |
| Ukraine                                                                                                                                              | 0.1            | 99.9  | 91.3  | 65.0  | 29.9 | 2.9   | 0.4         | 99.6  | 62.8  | 11.1 | 0.9  | 0.1   |
| Uruguay                                                                                                                                              | 1.3            | 98.7  | 94.6  | 89.1  | 75.3 | 34.8  | 19.8        | 80.2  | 27.9  | 6.7  | 0.9  | 0.1   |
| Vanuatu                                                                                                                                              | 41.1           | 58.9  | 40.3  | 14.0  | 0.0  | 0.0   | 69.0        | 31.0  | 11.5  | 7.9  | 1.4  | 0.2   |
| Venezuela                                                                                                                                            | 1.2            | 98.8  | 96.7  | 91.2  | 73.0 | 33.7  | 52.5        | 47.5  | 30.7  | 14.0 | 3.3  | 0.8   |
| Vietnam                                                                                                                                              | 3.2            | 96.8  | 85.6  | 60.6  | 25.2 | 8.2   | 21.3        | 78.7  | 42.5  | 17.5 | 3.0  | 0.7   |
| Wallis and Futuna*                                                                                                                                   | 100.0          | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 100.0       | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0   |
| Yémen                                                                                                                                                | 2.7            | 97.3  | 52.5  | 27.9  | 14.4 | 1.4   | 45.5        | 54.5  | 18.9  | 4.9  | 0.5  | 0.1   |
| Zambie                                                                                                                                               | 43.8           | 56.2  | 42.2  | 35.1  | 16.1 | 0.0   | 85.9        | 14.1  | 3.7   | 0.8  | 0.1  | 0.0   |
| Zimbabwe                                                                                                                                             | 45.6           | 54.4  | 37.5  | 28.4  | 2.5  | 0.0   | 77.2        | 22.8  | 4.3   | 0.7  | 0.0  | 0.0   |
| Monde                                                                                                                                                | 8.0            | 92.0  | 83.2  | 63.7  | 35.9 | 13.9  | 60.3        | 39.7  | 22.5  | 8.6  | 1.2  | 2     |

\*Territoires non indépendants.

## DISCUSSION

L'atlas a été calculé en utilisant plusieurs hypothèses, comprenant la transparence de l'atmosphère, la distribution spatiale vers le haut des villes, le spectre des sources lumineuses artificielles et l'horaire d'observation nocturne. Plus les conditions réelles diffèrent de ces hypothèses et plus la différence avec la réalité de la luminosité artificielle sera grande, comparée aux prédictions de l'atlas. En particulier, les sites d'observation près des torchères de puits de pétrole (par exemple dans le Dakota du Nord, la Mer du Nord, le Sahara et ailleurs) ou les volcans (par exemple le volcan Kilauea à Hawaï, dans la Grande Ile), sont prédits pour être beaucoup plus lumineux que ce que nos yeux percevaient du ciel, principalement en raison de la sensibilité du VIIRS dans l'infrarouge proche et secondairement en raison de la différence de la distribution spatiale vers le haut. D'autres sources d'écarts entre la prévision et les niveaux réelles de luminosité artificielle peuvent être les suivantes : l'enneigement, les habitudes d'éclairage extérieur (par exemple les lois efficaces contre la pollution lumineuse), la présence de lumières atypiques (par exemple l'éclairage de serres ou pour la pêche et les torchères des champs d'extraction de gaz), les extinctions d'éclairages, la présence d'éclairages temporaires détectés par les satellites et qui ne sont plus actifs, et vice-versa.

L'enneigement agit en amplifiant le flux vers le haut en provenance des villes et une relation presque linéaire entre la réflectivité du sol et la luminosité artificielle du ciel a été trouvé dans les modèles, à l'intérieur et à proximité (30 km) des villes (12). Compte tenu du fait que la neige est généralement retirée rapidement des routes éclairées, l'effet lumineux de la neige peut être plus faible que prévu. Ainsi, pour apprécier la grandeur de cet effet, une augmentation de la luminosité du ciel allant de 1,3 à 2,6 fois a été mesurée lorsque de la neige était partiellement présente sur les routes (13). L'enneigement réfléchit également la lumière artificielle venant du ciel pollué, ce qui augmente la luminosité artificiel du ciel d'au moins 10% (13).

Les conditions atmosphériques sont d'une importance primordiale. Si le ciel est plus clair ou plus nuageux que prévu, des changements de luminosité du ciel peuvent être attendus. Une légère augmentation du contenu en aérosols se traduit généralement par une plus grande pollution à proximité et à l'intérieur des villes avec potentiellement un assombrissement des sites éloignés de sources lumineuses (de très forts niveaux d'aérosols peuvent avoir d'autres effets). Les positions relatives des sources lumineuses et des sites d'observation peuvent entraîner un comportement non linéaire [par exemple, dans Cinzano et al. (14)]. A proximité des villes, lorsque le ciel est couvert, une multiplication du niveau de halo lumineux est à prévoir, [par exemple, à Berlin, un niveau 10 fois plus élevé (15)]. Les conséquences écologiques de l'éclairage artificiel nocturne sont donc plus grandes que ce à quoi on pourrait s'attendre, en ne regardant simplement que les niveaux mesurés pendant les nuits claires.

Les comparaisons avec le premier atlas devraient prendre en compte les différences dans les horaires des passages nocturnes du satellite et de l'étalonnage des données, les différentes distributions spatiales vers le haut utilisées, les calculs de l'altitude – par rapport au niveau de la mer, les différences d'enneigement dans certaines régions boréales, les différents niveaux supposés de luminosité naturelle, et les différents codes couleur des niveaux.

Dans la **Figure 5B**, nous montrons une carte de prévision illustrant l'effet possible sur la perception scotopique du ciel dans le cas d'une transition de l'éclairage au Sodium Haute Pression (SHP) vers un éclairage avec des Diodes ElectroLuminescentes (DEL) blanches en Europe. En supposant que le flux photopique et la distribution spatiale vers le haut restent les mêmes, une DEL blanche 4000°K est environ 2,5 fois plus polluante, dans la bande scotopique du spectre, qu'un l'éclairage SHP (16-18). Toutes les sources ayant une température de couleur corrélée (TCC) élevée sont plus polluantes, alors que celles ayant une TCC inférieure le sont moins. Cela implique, à moins que l'émission de lumière bleue soit limitée, qu'une transition vers cette technologie pourra doubler, voire plus, la luminosité du ciel nocturne, perçue par nos yeux adaptés à l'obscurité. La carte de la **Figure 5B** montre une multiplication du niveau de pollution lumineuse par 2,5 fois par rapport à celle de la **Figure 5A**. D'autres problèmes se posent également avec l'utilisation de sources ayant une forte TCC et des DEL blanches, par exemple une durée de récupération plus longue de l'adaptation à l'obscurité (19) et des effets sur de nombreuses fonctions physiologiques (20). Ce renforcement dans la bande scotopique et dans la partie bleue du spectre ne sera pas détecté par le VIIRS DNB en raison de son manque de sensibilité aux longueurs d'onde plus courtes que 500 nm. A cause de cela, le pic de lumière bleu émis par les DEL blanches n'est pas détecté et les mesures de luminosité qui ressortent comme équivalentes d'après le satellite ne traduisent pas réellement des luminosités équivalentes entre les sources SHP et DEL. Cela signifie que l'insensibilité au bleu du VIIRS DNB va indiquer dans un avenir proche, une fausse réduction de la pollution lumineuse dans de nombreuses villes alors que la luminosité du ciel telle que perçue par des yeux humains va en fait augmenter.

## CONCLUSIONS

Les résultats présentés ici démontrent que la pollution lumineuse est un problème mondial. La plus grande partie du monde est affectée par ce problème et l'humanité a enveloppé notre planète d'un brouillard lumineux qui empêche une majorité de la population mondiale d'avoir l'occasion d'observer notre galaxie. Cela engendre potentiellement un impact culturel d'une ampleur sans précédent. En outre, la pollution lumineuse provoque des conséquences écologiques planétaires (21). Elle pose des problèmes de santé publique (22-24) et de gaspillage d'énergie et d'argent (25). La pollution lumineuse doit être traitée immédiatement car, même si elle peut être instantanément diminuée (en éteignant les éclairages), ses conséquences ne le seront pas (par exemple, la perte de biodiversité et culturelle). Heureusement, les techniques visant à réduire sensiblement la pollution lumineuse sont déjà connues (16) et certaines d'entre elles ont déjà été mis en œuvre à relativement grande échelle (par exemple en Lombardie et dans la plupart des autres régions italiennes, en Slovénie, dans deux régions du Chili et dans une partie des îles Canaries). Les principales prescriptions pour réduire la pollution lumineuse sont les suivantes : un capotage systématique des sources lumineuses\* (ne permettant pas aux luminaires d'envoyer directement la lumière au-dessus de l'horizontale ou en dehors de la zone à éclairer), l'utilisation de la quantité de lumière minimale requise pour chaque activité, l'extinction de la lumière ou la diminution sensible des niveaux lumineux lorsque la zone n'est pas utilisée. Ces actions diminueront le flux lumineux global (comme cela se passe pour la plupart des autres polluants) et limitera fortement la lumière "bleu" qui interfère avec les rythmes circadiens et la vision scotopique.

\*NdT. En France, le terme technique utilisé serait complètement défilé, ce terme correspondant à une source lumineuse non décelable à distance, évitant l'éblouissement et concentrant la lumière vers le sol

La technologie peut aider à réduire encore l'impact de la pollution lumineuse, avec la mise en œuvre de l'éclairage adaptatif (par exemple, un éclairage public qui est régi, en temps réel, par des capteurs de trafic et des conditions météorologiques, ce qui réduirait sensiblement l'éclairage pendant une majeure partie de la nuit, dans les périodes de trafic faible ou nul). En regardant plus vers l'avenir, l'éclairage public ne serait plus nécessaire pour des voitures sans conducteur.

La pollution lumineuse est aussi une conséquence de la croyance selon laquelle la lumière artificielle augmente la sécurité sur les routes et prévient les crimes mais cette croyance ne repose pas sur des preuves scientifiques (26, 27). Dans une période où les ressources sont limitées, les pays devraient investir prudemment l'argent dans des moyens efficaces pour résoudre ces problèmes. Pour cette raison, les essais randomisés contrôlés devraient être utilisés pour étudier les effets - positifs, négatifs ou nuls - de la mise en place d'éclairage visant à une réduction de la délinquance, des crimes et des accidents de la route. Par exemple, il peut exister le cas où des conducteurs, réagissant à un surcroît de visibilité, roulent plus vite, ce qui augmente le risque d'accidents. De plus, l'éclairage public étant généralement installé sur des poteaux, ces derniers représentent un danger 24 heures sur 24. L'influence nette de l'éclairage public, dans les faits, est encore inconnue.

Pour l'avenir, il est possible d'imaginer deux scénarios. Peut-être que la génération actuelle sera la dernière connaissant un tel monde pollué par la lumière, si la pollution lumineuse est contrôlée avec succès. Dans l'autre cas, le monde va-t-il peut-être continuer à s'illuminer jusqu'à ce que presque toute sa population ne voit plus jamais les étoiles, comme dans une nouvelle d'Isaac Asimov *Nightfall*\*.

## MATERIELS ET METHODES

La modélisation de la luminosité du ciel, en utilisant comme entrée, les mesures de rayonnement vers le haut des sources artificielles est une méthode éprouvée pour décrire la pollution lumineuse sur des sites particuliers (28-30), sur une région (31, 32) ou même sur l'ensemble de la Terre (5). La télédétection du rayonnement vers le haut, avec une modélisation de la luminosité du ciel, est utilisée comme substitut d'observations de cette dernière, qui ne sont disponibles qu'uniquement que sur quelques localités.

### Données Satellitaires

L'atlas bénéficie des données d'imagerie à faible luminosité, nouvellement disponibles, provenant du capteur VIIRS DNB du satellite en orbite polaire Suomi (National Polar-orbiting Partnership - NPP). La DNB réalise chaque nuit une couverture globale selon une fauchée d'environ 3000 km, dont chaque pixel a une résolution spatiale de 742 m. Ces données ont une résolution linéaire presque 7 fois supérieure et une gamme dynamique 256 fois supérieure par rapport à celles du Meteorological Satellite - Program Operational Linescan System (DMSP-OLS) (33). La DNB est calibrée à bord et donne des mesures en unités de radiance ( $\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ). La DNB est sensible à la lumière dans une gamme allant de 0,5 à 0,9  $\mu\text{m}$ , par conséquent il couvre la zone du proche infrarouge, hors du spectre visible par l'œil humain, mais il est insensible dans les parties bleues et violettes du spectre visible. La courbe de la réponse spectrale relative testée avant le vol est donnée dans la **Figure.15**. Bien qu'un instrument ayant une sensibilité plus proche du spectre visible par l'œil humain eût été préférable, toutes les données d'imagerie à faible luminosité mondiales actuellement disponibles (DNB-OLS), ne sont sensibles qu'au proche infrarouge et non dans la partie bleue du spectre visible. Tout cela empêchera d'avoir un bon contrôle de l'évolution de la pollution lumineuse dans cette bande spectrale importante, où les DEL blanches actuellement installées, ont de fortes émissions.

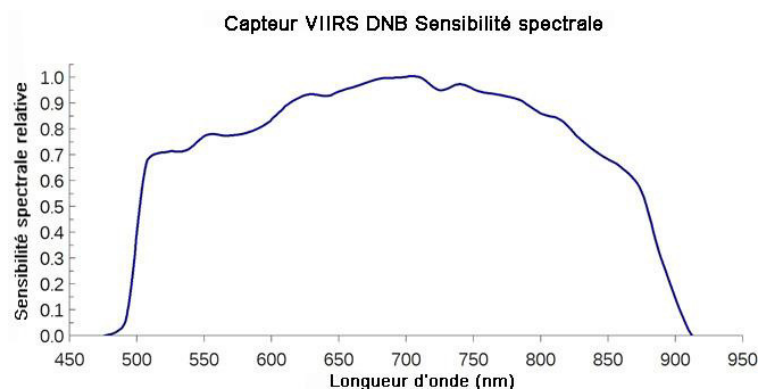


Fig. 15. sensibilité du VIIRS DNB

L'élaboration de l'atlas suppose l'accès à une vue globale de la Terre de nuit. Les sources de lumières nocturnes étant de nature dynamique, parfois masquées par la couverture nuageuse, ou bien non pertinentes par rapport à la finalité de l'atlas (ex. incendies, orages, aurores) ; une imagerie composite doit être constituée. L'Earth Observation Group (EOG) - Groupe d'observation de la Terre du National Oceanic and Atmospheric Administration's National Centers for Environmental Information, développe les techniques de traitement des données DNB, qui permettent de générer une cartographie des sources de lumières. Les images sont construites à partir de l'échantillonnage mensuel des mesures DNB de radiance, selon une grille de résolution 15 arcsec à la surface du globe, chaque maille est alors affectée de la moyenne des mesures. Seules les données de nuit, sans nuage et sans lune, sont traitées. Les données DNB affectées de lumières parasites, d'artefacts capteurs, sont filtrées et éliminées avant l'opération de moyenne (34).

Lors de l'élaboration de l'atlas, l'EOG avait terminé le traitement de 6 mois de données DNB collectées durant les mois de Mai, Juin, Septembre, Octobre, Novembre et Décembre 2014. Ces données ont été combinées en une seule imagerie composite, chaque maille de la grille représentant une valeur de luminosité moyenne pour toutes les observations de cette période de 6 mois. Parce que l'EOG développait encore les algorithmes pour supprimer les incendies et autres lumières éphémères des données composites DNB, le résultat 2013 des éclairages stables du capteur DMSP-OLS a été utilisé pour masquer les sources lumineuses aléatoires. L'utilisation des données en Novembre et Décembre 2014 signifie que ce rayonnement a été quelque peu augmenté dans les villes qui avaient un enneigement très important à cette époque, (par exemple, à Edmonton et à Calgary au Canada, mais pas Vancouver ou à Toronto, ni la plupart des villes du Nord aux États-Unis).



## Technique d'élaboration des cartes

Les cartes de Falchi et al. (35) ont été calculées, suivant la méthode de Cinzano et al. (36), dans la Bande V Johnson-Cousins, avec une atmosphère claire standard US62, un coefficient de clarté d'aérosol (37)  $K = 1$  correspondant à une extinction verticale, au niveau de la mer, de  $\Delta m = 0.33$  mag dans la bande V, une visibilité horizontale  $\Delta x = 26$  km, et une profondeur optique  $\tau = 0.31$ . L'extinction verticale au niveau de la mer devient  $\Delta m = 0.21$  mag pour les sites à 1000 m d'altitude,  $\Delta m = 0.15$  mag pour ceux à 2000 m d'altitude, et  $\Delta m = 0.11$  mag pour ceux à 3000 m d'altitude.

La luminosité du ciel au zénith sur chaque site a été obtenue en intégrant la contribution de la lumière provenant des sources jusqu'à une distance de 195 km, ce qui correspond à un rayon de 210 pixels à l'équateur. Les cartes ont été calculées en tenant compte de l'altitude par rapport au niveau de la mer, telle que trouvées dans les données numériques d'altitude GTOPO30 (38). Le masquage par la courbure de la Terre (effet d'ombre) a été pris en compte – mais pas les effets de celui-ci par les montagnes. Ces derniers sont généralement faibles, sauf pour des cas particuliers (36). Le calcul d'un atlas, incluant les effets de masquage des montagnes, n'a pas été possible avec la puissance des ordinateurs à notre disposition (36 PC Intel i5). Le calcul de l'atlas a nécessité 200 jours d'équivalent temps sur PC Intel i5.

Bien que la luminosité au zénith donne directement des informations pour un seul point dans le ciel (généralement le plus sombre), cela peut être utilisé pour déduire d'autres grandeurs physiques, telles que l'éclairement horizontal (39). Nous travaillons sur une modélisation de prévisions sur la sphère pour calculer, sur de grands territoires, d'autres grandeurs (par exemple, l'éclairement horizontal, l'éclairement et la luminosité verticale moyenne et maximale, et l'éclairement scalaire).

## Données sur la luminosité du ciel

Un ensemble de mesures de luminosité du ciel nocturne effectuées avec des SQM portables ou montés sur véhicule, a été regroupé avec celles venant aussi bien de chercheurs professionnels que de citoyens scientifiques. Les données ont été filtrées pour éliminer les périodes de crépuscule ou de lune, ainsi que les mesures où les observateurs ont signalé certaines conditions problématiques (par exemple, de la neige ou du brouillard). Après ce processus, il est resté 20.865 mesures, avec les plus importantes contributions individuelles venant de zones proches de la Catalogne (7400), Madrid [voir (40)] (5355) et Berlin (2371). Globe at Night [voir (41)] a donné un total de 4114 mesures, provenant de sites sur tous les continents, avec environ 20% effectuées en dehors de l'Amérique du Nord ou de l'Europe. Pour réduire l'influence des sites ayant un grand nombre de mesures (par exemple, 10 observations ou plus pendant une seule nuit), nous avons écarté les données selon une grille de 30 arcsec et attribué un «poids efficace» avec  $(n_e \sqrt{N_T})^{-1}$  où  $N_T$  est le nombre total de nuits pendant lesquelles les mesures ont été effectuées et  $n_e$  le nombre d'observations pendant une même nuit.

Des observations répétées au cours d'une même nuit ne sont pas indépendantes. Si elles renseignent sur l'évolution de la radiance du ciel au cours de la nuit, elles portent une information moindre que ne le ferait le même nombre d'observations durant cette même nuit, mais effectuées en des lieux éloignés les uns des autres. La contribution dans l'ensemble des données, des différentes mesures réalisées en un même lieu au cours d'une même nuit, est ainsi réduite à une seule observation indépendante. Par ailleurs, des observations conduites en un même lieu, au cours de nombreuses nuits, alimentent la base avec des mesures, probablement effectuées sous différentes conditions atmosphériques, différents jours de la semaine, à différentes heures de la nuit ou encore différentes saisons. Ces données portent une information sur le halo caractéristique du lieu, meilleure que ne peut le faire une seule observation, mais toutefois moindre que le même nombre d'observations conduites en des lieux parfaitement indépendants. Sur l'Ensemble de données (SD - Set Data en anglais), l'incertitude sur l'écart-type de la valeur de radiance décroît avec le carré du nombre d'observations indépendantes, les observations multiples sont affectées d'une pondération définie dans ces proportions. Par exemple, le poids associé à cinq observations, réalisées sur quatre nuits, sur un même lieu, est identique à celui de deux observations réalisées en deux lieux éloignés. Ce protocole de pondération a conduit à retenir un total de 10.441 "observations effectives".

Les observations ont été ajustées pour estimer la composante de la luminosité artificielle du ciel en soustrayant la composante naturelle calculée avec un modèle de luminosité naturelle du ciel dans la bande V (42). Le modèle a été adapté au site, la date et l'heure de chaque observation, et à une prévision du total des luminosités de la Voie Lactée, de la lumière zodiacale et de la luminescence naturelle, pouvant être mesurée par un instrument SQM-L visant le zénith. Pour une date donnée, la mesure de la luminosité naturelle du fond du ciel, a été prédite sur la base de sa relation avec l'activité solaire, suite aux travaux de Krisciunas et al. (43).

## Calibration

Les cartes sont construites sous trois hypothèses de distribution angulaire des émissions urbaines de lumière: une distribution lambertienne (carte A), une distribution avec un maximum d'intensité aux angles proches de l'horizon (carte B), et une distribution avec un maximum d'intensité pour des angles intermédiaires (carte C) (**Figure. 1**) (44). La prévision de luminance au zénith ( $\text{cd/m}^2$ ) en chaque lieu est donnée par la relation  $B = SN + (W_a A + W_b B + W_c C)(1 + dh)$ , où  $N$  est la luminosité naturelle du ciel estimée par le modèle de Duriscoe;  $S$  est un facteur de conversion entre la radiance SQM et la luminance;  $W_a$ ,  $W_b$ , et  $W_c$  sont les pondérations identifiées, affectées à chacune des cartes;  $A$ ,  $B$ , et  $C$  sont des valeurs d'entrée de prévision de luminance du ciel au zénith des trois cartes respectivement;  $d$  est un facteur qui caractérise les variations d'émission de lumière artificielle au cours de la nuit; et  $h$  est le temps compté en heures après minuit (négativement avant minuit). La plupart des territoires les plus pollués montre une diminution progressive des émissions en cours de la nuit (45), qui se traduit par des variations de l'ordre de  $0,3 \text{ mag}_{\text{SQM}}/\text{arcsec}^2$  entre 20h00 et 02h00, d'où l'importance du paramètre  $d$ . La luminance étant convertie en radiance ( $\text{mag}_{\text{SQM}}/\text{arcsec}^2$ ), la meilleure interpolation est obtenue par minimisation d'une fonction de vraisemblance. La fonction de vraisemblance suppose 80% de probabilité pour que les écarts entre mesures indépendantes et prévision obéissent à une loi normale (avec un écart type  $\sigma$ ), et 20% de probabilité que les mesures s'en écartent. Les six paramètres d'interpolation sont  $S$ ,  $W_a$ ,  $W_b$ ,  $W_c$ ,  $d$ , et  $\sigma$ . Les facteurs de pondération  $W_a$ ,  $W_b$ , et  $W_c$  peuvent prendre des valeurs négatives dans la mesure où l'intensité résultante d'émission est positive à tout angle.

Les paramètres les mieux adaptés pour l'ensemble de données mondiales étaient  $S = 1,15$ ,  $W_a = 1,9 \times 10^{-3}$ ,  $W_b = 5,2 \times 10^{-4}$ ,  $W_c = 7,6 \times 10^{-5}$ ,  $d = -4,5\%$  par heure, et  $\sigma = 0,15 \text{ mag}_{\text{SQM}}/\text{arcsec}^2$ . La distribution angulaire de la lumière dirigée vers le haut avec ces paramètres est indiquée en rouge dans la **Figure.1**. Des paramètres ont également été utilisés individuellement dans des sous-ensembles de données pour étudier la variation dans des différentes régions. Dans tous les cas, la carte ayant le plus grand poids, était la carte correspondant à l'émission lambertienne. Dans la plupart des cas individuels, la carte ayant un maximum d'émission aux angles intermédiaires donnait une valeur négative. La différence pourrait être liée à l'orographie locale (présence d'ombre), qui n'a pas été pris en compte par le modèle de transfert radiatif, et à des conditions atmosphériques différentes que celles prévues dans le modèle. Cette question sera examinée plus en détail, dans un prochain article.

La comparaison entre luminosité du ciel et prévisions de l'atlas est présentée pour l'ensemble des observations en **Figure.16**. Le graphe de gauche est un histogramme à deux entrées des luminosités mesurées et modélisées, défini par intervalles de radiance de  $0,1 \text{ mag}_{\text{SQM}}/\text{arcsec}^2$ , qui donne le nombre d'observations pondérées dans chaque cellule. L'échelle de couleur est logarithmique, avec le bleu représentant moins de 1 observation pondérée, et le rouge représentant entre 5 et 35 observations pondérées. Les observations hors loi normale correspondent pratiquement toujours au cas où la luminance observée est significativement supérieure à la valeur de l'atlas. L'examen d'une sélection des lieux concernés révèle que ces observations ont généralement été effectuées à proximité d'une source lumineuse, par exemple un lampadaire. Leurs incidences sur l'interpolation est limitée, à la fois parce qu'elles représentent une faible fraction des données, et encore parce que la possibilité de mesures hors loi normale est prise en compte dans la construction de la fonction de vraisemblance. La pondération des observations hors loi normale est pratiquement toujours inférieure à 1, parce que ces observations tendent à être issues du même lieu d'une agglomération, appartenant à la même maille spatiale. L'histogramme de droite **Figure.16** montre les résidus correspondant à l'ensemble des données (le nombre total d'observations, non pondéré).

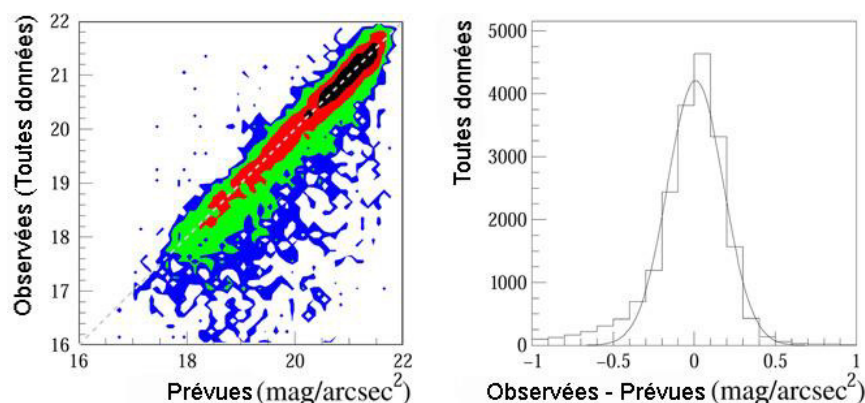
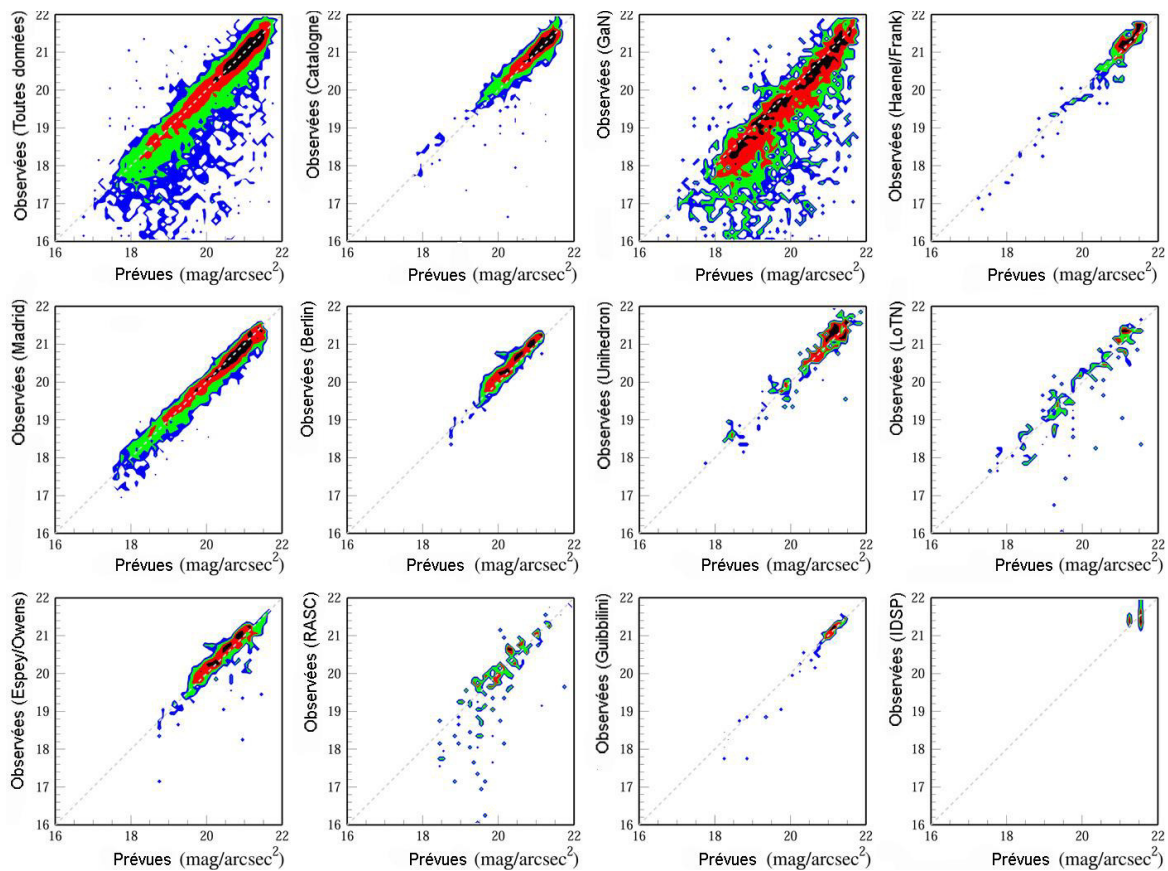


Fig. 16. Comparaison des mesures de luminosité du ciel avec les prévisions de l'atlas

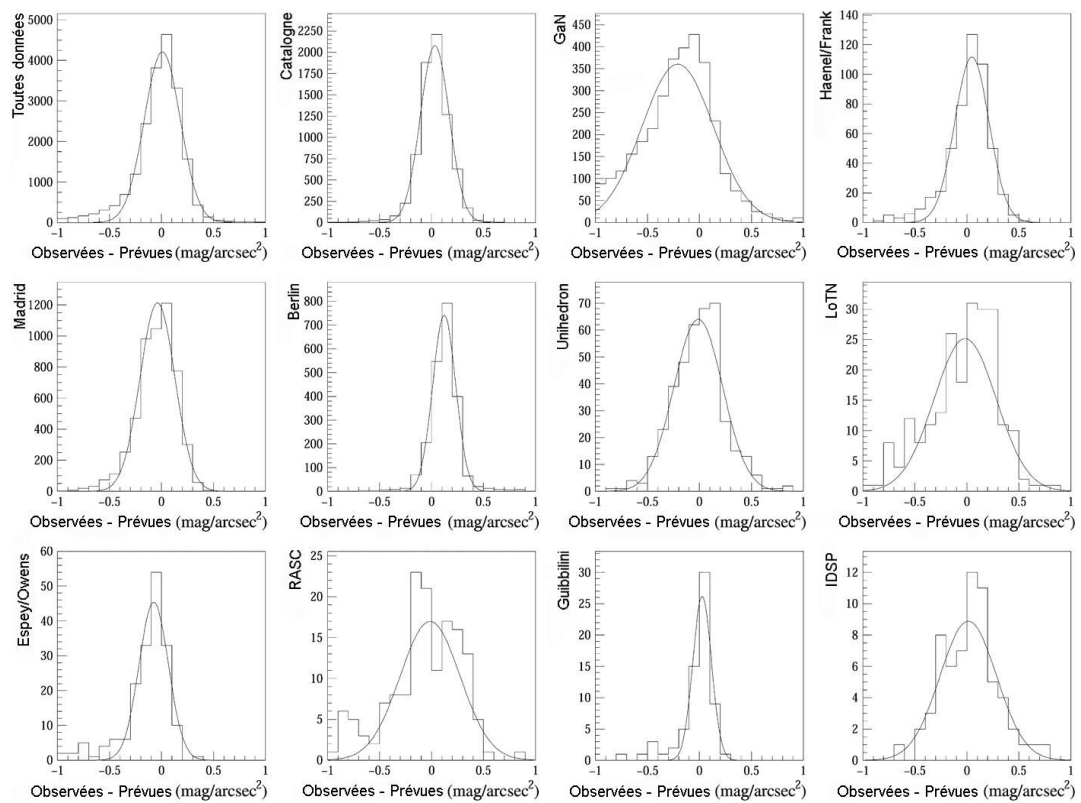
(A Gauche) Diagramme de répartition du nombre, pondéré, d'observation SQM en fonction des prévisions de l'atlas, par intervalles de  $0,1 \text{ mag}_{\text{SQM}}/\text{arcsec}^2$ . L'échelle de couleur est logarithmique:  $<0,7$  observation pondérée (bleu),  $0,7$  à  $5$  observations pondérées (vert),  $5$  à  $35,5$  observations pondérées (rouge),  $35,5$  à  $251$  observations pondérées (noir). (A droite) Qualité d'interpolation de l'ensemble des données par le modèle (écart entre valeurs SQM mesurées et modélisées), sous la forme d'une distribution gaussienne. Les valeurs négatives indiquent que l'observateur a rapporté une valeur de luminance plus importante que ne le prévoit l'atlas, tandis que les valeurs positives signifient que l'observateur a rapporté un ciel plus sombre que modélisé. La queue de distribution "luminance mesurée plus grande que modélisée", traduit généralement, soit une pollution par des sources de lumière proches, soit des conditions d'observation incorrectement reportées (par exemple nuages, brume, ou brouillard). L'histogramme donne le nombre total d'observations, nombre non pondéré, de sorte que certains lieux contribuent pour plusieurs entrées.

L'ajustement global effectue un travail raisonnable pour combiner tous les ensembles de données individuels (**figures 17, 18 et 19 et le tableau 3**). En **Figure.17**, l'échelle des couleurs est logarithmique, mais à échelle réduite pour correspondre individuellement à la taille de chaque ensemble de données. Les données des **figures 17 et 18** sont disposées suivant la taille de l'ensemble de données. Celles de la Catalogne, en Espagne, ont été collectées en voiture par des scientifiques professionnels. Les données Globe at Night, Unihedron, Loss of the Night ont été effectuées par des citoyens scientifiques du monde entier. Les données Haenel/Frank ont été collectées en Europe et en Amérique du Nord, et en particulier, comprennent un grand nombre d'observations dans les Réserves Internationales et Sites de Ciel Noir (Etoilés). Celles des villes de Madrid (40) et Berlin, et leurs environs, ont été faites en voiture, dans leurs villes respectives, par des scientifiques professionnels. Celles d'Espey/Owens ont été faites par des scientifiques professionnels et des citoyens scientifiques en Irlande. Celles de la Société royale d'astronomie du Canada, l'ont été au Canada par des bénévoles de cette Société. En Italie, les données de Giubbilini, l'ont été par un scientifique professionnel. Enfin celles de l'International Dark Sky Places l'ont été sur un petit nombre d'endroits, dans deux Sites de Ciel Noir (Etoilé).



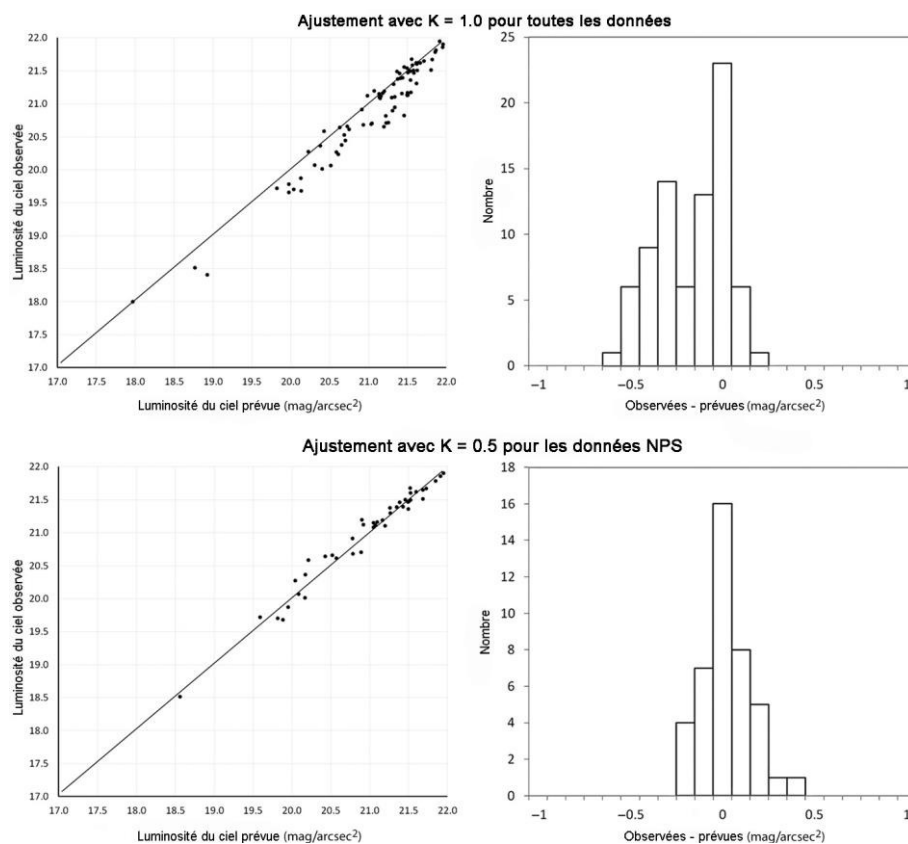
**Fig. 17. Diagrammes comparant le nombre pondéré de mesures SQM par rapport aux prévisions de l'atlas.**

L'échelle de couleur est logarithmique et mise à l'échelle par rapport à la valeur de crête. Les mesures des citoyens scientifiques ont tendance à être légèrement plus lumineuses que celles effectuées par des professionnels, avec de plus grandes - importantes queues pour des valeurs très lumineuses, probablement à cause d'observations effectuées trop près de lampadaires ou dans des conditions atmosphériques non idéales. GaN, Globe at Night; LoTN, Loss of the Night - Perte de la nuit; RASC, Société royale d'astronomie du Canada; IDSP, Sites International de Ciel Noir (Etoilé) - International Dark Sky Places.



**Fig. 18. Histogrammes montrant la qualité d'interpolation (valeurs observées SQM, moins celles prévues), pour l'ensemble des données et pour chacun des différents pourvoyeurs de données.**

Les valeurs négatives signifient que l'observateur a mesuré un ciel plus lumineux que celui prévu par l'atlas, alors que les valeurs positives signifient que l'observateur a mesuré un ciel plus sombre que prévu. Les histogrammes indiquent le nombre total d'observations, et non pas les observations pondérées, de même que les sites contribuant à des entrées répétées. En surimpression les meilleurs ajustements gaussiens.



**Fig. 19. Comparaisons entre les mesures CCD de luminosité du ciel du Service des Parcs Nationaux (NPS) et les prévisions de l'atlas.**

(A gauche) Diagrammes de comparaison de mesures CCD avec les prévisions de l'atlas (diagramme en haut, contenu en aérosol K=1; diagramme en bas, K=0,5), (A droite) Qualité d'interpolation – résidus, entre mesures CCD du NPS et prévisions de l'atlas (écart entre valeurs mesurées et modélisées) (histogramme en haut, K=1; histogramme en bas, K=0,5),



**Tableau 3. Performance des prévisions de l'atlas pour différents ensembles de données.**

Les valeurs négatives indiquent que le ciel observé était plus lumineux que prévu. Les entrées supérieures sont utilisées pour calibrer l'atlas. Les trois dernières entrées sont des ensembles de données indépendantes utilisées pour vérification. SP, scientifique professionnel; CS, citoyen scientifique.

| Pourvoyeurs                          | Localisation               | Moyen(s)           | Moyenne | $\sigma$ | Scientifique |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------|----------|--------------|
| Toutes les données                   | Monde entier               | Divers             | 0.008   | 1.17     | Mixte        |
| Diverses                             | Catalogne, Espagne         | Voiture            | 0.03    | 0.14     | SP           |
| Université Complutense de Madrid     | Madrid, Espagne            | Voiture            | 0.04    | 0.17     | SP           |
| Kyba/Sanchez                         | Berlin, Allemagne          | Voiture            | 0.12    | 0.11     | SP           |
| Globe at Night                       | Monde entier               | Manuelle           | 0.21    | 0.34     | CS           |
| Haenel/Frank                         | Europe et Amérique du nord | Manuelle           | 0.05    | 0.17     | CS           |
| Unihedron                            | Monde entier               | Manuelle           | 0.01    | 0.24     | CS           |
| Application Loss of the Night        | Monde entier               | Manuelle           | 0.02    | 0.29     | CS           |
| Espey/Owens                          | Irlande                    | Manuelle           | 0.08    | 0.14     | Mixte        |
| Royal Astronomical Society of Canada | Canada                     | Manuelle           | 0.01    | 0.21     | CS           |
| Giubbilini                           | Italie                     | Manuelle           | 0.03    | 0.09     | SP           |
| International Dark Sky Places        | Pays de Galles             | Manuelle           | 0.01    | 0.27     | CS           |
| U.S. National Park Service (NPS)     | Etats Unis                 | CCD                | 0.11    | 0.13     | SP           |
| Falchi                               | Italie                     | CCD                | 0.04    | 0.19     | SP           |
| Stations SQM                         | Monde entier               | Station Permanente | 0.06    | 0.46     | Mixte        |

Les données de citoyens scientifiques comportent plus de valeurs aberrantes, par rapport aux données venant de scientifiques professionnels. Toutefois, ces données sont d'une grande valeur parce qu'elles comportent des observations ayant beaucoup plus de paramètres différents, associés à des sites en dehors de l'Europe et des États-Unis, ainsi que dans des zones particulièrement bien éclairées. Les données des citoyens scientifiques ont aussi une distribution résiduelle plus large. Probablement, cela est dû en partie, à des observations faites dans une plus grande variété de conditions atmosphériques. Les données de Berlin, par exemple, ont une distribution très étroite, et leur moyenne est plus sombre que prévu. Ceci probablement, parce que ces données ont été acquises sur seulement trois nuits, avec une clarté atmosphérique exceptionnelle.

Des contrôles de cohérence de l'étalonnage des SQM ont également été effectuées à l'aide des données CCD collectés par Falchi (13) et l'US National Park Service (46), ceci montrant une différence entre les mesures calibrées SQM et prévisions de l'atlas d'environ 1/10ème de magnitude (**Figure. 19**, en haut, et le **tableau 3**). La méthode a également été vérifiée avec le calcul de cartes de l'ouest des États-Unis avec une grande transparence pour mieux se conformer aux conditions régnant dans cette région, ayant une clarté d'aérosol de  $K = 0,5$  correspondant à une extinction verticale, au niveau de la mer  $\Delta m = 0,23$  mag, une visibilité horizontale de  $D_x = 48$  km, et une profondeur optique  $\tau = 0,21$ . A 1000 m d'altitude par rapport au niveau de la mer, l'extinction verticale devient  $\Delta m = 0,17$  mag, alors qu'à 2000 m d'altitude,  $\Delta m = 0,13$  mag. Les ajustements avec les données observées sont présentés dans la **Figure.19** (en bas), mais ces cartes ne sont pas présentées ici. Enfin, l'ajustement a été comparé à un ensemble de données moyennes par ciel clair, provenant de stations fixes SQM (44). Dans ce dernier cas, l'ensemble de données (Set Data – SD), est considérablement plus grand que celui des autres ensembles de données et est probablement due à une sélection moins rigoureuse de ciels transparents.

## Statistiques de la luminosité nocturne

Nous avons calculé le pourcentage de personnes vivant sous différents niveaux de luminosité du ciel dans différents pays, ainsi que le pourcentage de leurs territoires soumis à différents niveaux de luminosité du ciel. En utilisant des intervalles de luminosité du ciel suivants :

- (i) En dessous et jusqu'à 1% de la luminosité naturelle (de 0 à  $1,7 \mu\text{cd/m}^2$ ) - ciel naturel, parfait
- (ii) De 1 à 8% au-dessus de la luminosité naturelle ( $1,7$  à  $14 \mu\text{cd/m}^2$ ) - relativement non pollués au zénith, mais dégradé à l'horizon
- (iii) De 8 à 50% au-dessus de la luminosité naturelle nocturne ( $14$ - $87 \mu\text{cd/m}^2$ ) - ciel pollué, dégradé jusqu'au zénith
- (iv) De 50% et au-dessus de la luminosité naturelle sous laquelle la Voie lactée n'est plus visible en totalité ( $87$ - $688 \mu\text{cd/m}^2$ ) – l'aspect d'un ciel naturel disparaît
- (v) De la disparition de la Voie Lactée à la stimulation connue des cônes ( $688$ - $3000 \mu\text{cd/m}^2$ )
- (vi) Intensités lumineuses nocturnes très élevées ( $> 3000 \mu\text{cd/m}^2$ ) - l'adaptation à la vision nocturne n'est plus possible pour les yeux humains

Tout d'abord, nous avons converti les pays du monde en polygones, obtenus à partir du Data and Maps Media Kit ESRI (47), dans un fichier raster ayant une résolution de 30 secondes d'arc (arc sec). Ensuite, nous avons lié chaque pixel de ce fichier, aux valeurs de pixels obtenues à partir de deux autres fichiers raster en cours d'analyse, notre fichier raster des cartes de luminosité artificiel du ciel au zénith et le fichier raster de la population mondiale (48). La fusion de données a été réalisée avec le logiciel ArcGIS 10.x, en utilisant sa fonctionnalité de traitement de raster "extraction de plusieurs valeurs". Ensuite, nous avons utilisé la version SPSS 22 du logiciel de statistiques, pour combiner les chiffres de la population et les pourcentages de la superficie des territoires, en différents groupes d'exposition correspondant aux niveaux susnommés de luminosité nocturne.

Ceci est un article en accès libre, distribué sous les termes de la licence de création - sans Utilisation Commerciale Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), qui permet une utilisation, une distribution et une reproduction sur tout support, aussi longtemps que cette utilisation ne génère pas d'intérêt commercial, et à condition que le travail original soit correctement cité.

## REFERENCES ET NOTES

1. P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, K. E. Baugh, *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 318, 641–657 (2000).
2. R. H. Garstang, *Night-sky brightness at observatories and sites*. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 101, 306–329 (1989).
3. M. Smith, *Time to turn off the lights*. *Nature* 457, 27 (2009).
4. K. J. Gaston, M. E. Visser, F. Hölker, *The biological impacts of artificial light at night: The research challenge*. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B* 370, 20140133 (2015).
5. P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 328, 689–707 (2001).
6. D. M. Duriscoe, C. B. Luginbuhl, C. A. Moore, *Measuring night-sky brightness with a wide-field CCD camera*. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 119, 192–213 (2007).
7. P. Cinzano, F. J. D. Castro, *The artificial sky luminance and the emission angles of the upward light flux*. *Mem. Soc. Astron. Ital.* 71, 251 (2000).
8. C. B. Luginbuhl, C. E. Walker, R. J. Wainscoat, *Lighting and astronomy*. *Phys. Today* 62, 32 (2009).
9. F. G. Smith, *Report and recommendations of IAU Commission 50, Reports on astronomy*. *IAU Trans. XVIIA*, 218 (1979).
10. Commission Internationale de l'Eclairage, *Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*. Publication CIE No. 41 (ed. 1, 1978; reprint, 1994) (Bureau Central de la CIE, Paris, 1994).
11. F. Patat, O. S. Ugolnikov, O. V. Postlyakov, *UBVRI twilight sky brightness at ESO-Paranal*. *Astron. Astrophys.* 455, 385–393 (2006).
12. M. Aubé, *Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment*. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B* 370, 20140117 (2015).
13. F. Falchi, *Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 412, 33–48 (2010).
14. P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, Recent progresses on a Second World Atlas of the night-sky brightness, in *Starlight—A Common Heritage*, C. Marin, J. Jafari, Eds. (Starlight Initiative and Instituto de Astrofísica de Canarias, Canary Islands, Spain, 2007), pp. 385–400.
15. C. C. M. Kyba, T. Ruhtz, J. Fischer, F. Hölker, *Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems*. *PLOS ONE* 6, e17307 (2011).
16. F. Falchi, P. Cinzano, C. D. Elvidge, D. M. Keith, A. Haim, *Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility*. *J. Environ. Manage.* 92, 2714–2722 (2011).
17. M. Aubé, J. Roby, M. Kocifaj, *Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility*. *PLOS ONE* 8, e67798 (2013).
18. C. B. Luginbuhl, P. A. Boley, D. R. Davis, *The impact of light source spectral power distribution on sky glow*. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 139, 21–26 (2014).
19. H. Jin, S. Jin, L. Chen, S. Cen, K. Yuan, *Research on the lighting performance of LED street lights with different color temperatures*. *IEEE Photonics J.* 7, 1–9 (2015).

20. G. Tosini, I. Ferguson, K. Tsubota, *Effects of blue light on the circadian system and eye physiology*. *Mol. Vis.* 22, 61–72 (2016).
21. C. Rich, T. Longcore, *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (Island Press, Washington, DC, 2005).
22. S. M. Pauley, *Lighting for the human circadian clock: Recent research indicates that lighting has become a public health issue*. *Med. Hypotheses* 63, 588–596 (2004).
23. R. G. Stevens, D. E. Blask, G. C. Brainard, J. Hansen, S. W. Lockley, I. Provencio, M. S. Rea, L. Reinlib, *Meeting report: The role of environmental lighting and circadian disruption in cancer and other diseases*. *Environ. Health Perspect.* 115, 1357–1362 (2007).
24. A. Haim, B. A. Portnov, *Light Pollution as a New Risk Factor for Human Breast and Prostate Cancers* (Springer, Dordrecht, 2013).
25. T. Gallaway, R. N. Olsen, D. M. Mitchell, *The economics of global light pollution*. *Ecol. Econ.* 69, 658–665 (2010).
26. P. R. Marchant, *A demonstration that the claim that brighter lighting reduces crime is unfounded*. *Br. J. Criminol.* 44, 441–447 (2004).
27. R. Steinbach, C. Perkins, L. Tompson, S. Johnson, B. Armstrong, J. Green, C. Grundy, P. Wilkinson, P. Edwards, *The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: Controlled interrupted time series analysis*. *J. Epidemiol. Community Health* 69, 1118–1124 (2015).
28. P. Cinzano, C. D. Elvidge, *Night sky brightness at sites from DMSP-OLS satellite measurements*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 353, 1107–1116 (2004).
29. M. Aubé, M. Kocifaj, *Using two light-pollution models to investigate artificial sky radiances at Canary Islands observatories*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 422, 819–830 (2012).
30. D. M. Duriscoe, C. B. Luginbuhl, C. D. Elvidge, *The relation of outdoor lighting characteristics to sky glow from distant cities*. *Light. Res. Technol.* 46, 35–49 (2014).
31. F. Falchi, *Luminanza artificiale del cielo notturno in Italia*, Master's thesis, Università di Milano (1998).
32. F. Falchi, P. Cinzano, *Maps of artificial sky brightness and upward emission in Italy from DMSP satellite measurements*. *Mem. Soc. Astron. Ital.* 71, 139 (2000).
33. C. D. Elvidge, K. E. Baugh, M. Zhizhin, F.-C. Hsu, *Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights*. *Proc. Asia-Pac. Adv. Network* 35, 62 (2013).
34. K. Baugh, F.-C. Hsu, C. D. Elvidge, M. Zhizhin, *Nighttime lights compositing using the VIIRS day-night band: Preliminary results*. *Proc. Asia-Pac. Adv. Network* 35, 70 (2013).
35. F. Falchi, P. Cinzano, D. Duriscoe, C. C. M. Kyba, C. D. Elvidge, K. Baugh, B. Portnov, N. A. Rybnikova, R. Furgoni, *Supplement to the New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness*, GFZ Data Services (2016); <http://doi.org/10.5880/GFZ.1.4.2016.001>.
36. P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, *Naked-eye star visibility and limiting magnitude mapped from DMSP-OLS satellite data*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 323, 34–46 (2001).
37. R. H. Garstang, *Model for artificial night-sky illumination*. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 98, 364–375 (1986).
38. D. B. Gesch, K. L. Verdin, S. K. Greenlee, *New land surface digital elevation model covers the Earth*. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 80, 69–70 (1999).
39. M. Kocifaj, T. Posch, H. A. Solano Lamphar, *On the relation between zenith sky brightness and horizontal illuminance*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 446, 2895–2901 (2015).
40. J. Zamorano, A. S. de Miguel, F. Ocaña, B. Pila-Diez, J. Gómez Castaño, S. Pascual, C. Tapia, J. Gallego, A. Fernández, M. Nievas, *Testing sky brightness models against radial dependency: A dense two dimensional survey around the city of Madrid, Spain*. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 10.1016/j.jqsrt.2016.02.029 (2016).
41. C. C. M. Kyba, J. M. Wagner, H. U. Kuechly, C. E. Walker, C. D. Elvidge, F. Falchi, T. Ruhtz, J. Fischer, F. Hölker, *Citizen science provides valuable data for monitoring global night sky luminance*. *Sci. Rep.* 3, 1835 (2013).
42. D. M. Duriscoe, *Measuring anthropogenic sky glow using a natural sky brightness model*. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 125, 1370–1382 (2013).
43. K. Krisciunas, D. R. Semler, J. Richards, H. E. Schwarz, N. B. Suntzeff, S. Vera, P. Sanhueza, *Optical sky brightness at Cerro Tololo Inter-American observatory from 1992 to 2006*. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 119, 687–696 (2007).
44. P. Cinzano, F. Falchi, *The propagation of light pollution in the atmosphere*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 427, 3337–3357 (2012).

45. C. C. M. Kyba, K. P. Tong, J. Bennie, I. Birriel, J. J. Birriel, A. Cool, A. Danielsen, T. W. Davies, P. N. den Outer, W. Edwards, R. Ehlert, F. Falchi, J. Fischer, A. Giacomelli, F. Giubbilini, M. Haaima, C. Hesse, G. Heygster, F. Hölker, R. Inger, L. J. Jensen, H. U. Kuechly, J. Kuehn, P. Langill, D. E. Lolkema, M. Nagy, M. Nievas, N. Ochi, E. Popow, T. Posch, J. Puschnig, T. Ruhtz, W. Schmidt, R. Schwarz, A. Schwöpe, H. Spoelstra, A. Tekatch, M. Trueblood, C. E. Walker, M. Weber, D. L. Welch, J. Zamorano, K. J. Gaston, *Worldwide variations in artificial skyglow*. *Sci. Rep.* 5, 8409 (2015).
46. U.S. National Park Service, *Night Sky Monitoring Database*, <http://nature.nps.gov/night/skymap.cfm> [Consulté le 28 mai 2016].
47. ArcGIS, *World Countries*, <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=3864c63872d84aec91933618e3815dd2> [Consulté le 28 mai 2016].
48. Oak Ridge National Laboratory, *LandScan*<sup>TM</sup>, <http://web.ornl.gov/sci/landscan/> [Consulté le 28 mai 2016].
- 

## Remerciements :

Nous sommes reconnaissants envers les personnes et les groupes qui nous ont fourni les données de luminosité du ciel : J. Zamorano, A. Sanchez de Miguel, S.J. Ribas, A. Haenel, S. Frank, F. Giubbilini, B. Espey, S. Owens, le Parc Astronomique Montsec, Directio Generala de Qualitat Ambiental de la Generalitat de Catalunya, Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (El Instituto de Ciencias del Cosmos—Universitat de Barcelona), Attivarti.org, la Société royale d'astronomie du Canada, l'International Dark Sky Association, et les centaines de citoyens scientifiques anonymes. Nous remercions la Coopération européenne en science et technologie - European Cooperation in Science and Technology (COST), et le réseau Lost The Night (ES 1204) - Perte de la Nuit, pour avoir donné la possibilité, à plusieurs auteurs, de se rencontrer pour discuter ensemble de ce travail. En outre, la plupart des données de Berlin ont été acquises au cours d'une mission scientifique ayant reçu un financement à court terme du COST. Nous remercions H. Kuechly pour l'extraction de la carte de prévisions pour chacun des sites SQM. Fabio Falchi est redevable, pour leur soutien au cours des années de gestation de ce projet, envers M. G. Smith, P. Sanhueza, C. Marin, et C. R. Smith. F.F. remercie S. Klett, A. Weekes de iCandi Apps Ltd., A. Crumey, A. B. Watson et A. J. Zele pour leurs contributions à différents niveaux. Financement : Une partie du travail préliminaire, effectué à l'Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso, a été soutenu par l'Agence spatiale italienne (contrat I/R/160/02). Aucun fond spécifique n'a été utilisé pour ce travail.

## Contributions des auteurs :

Fabio Falchi (F.F.) a conçu et dirigé l'étude, a écrit le manuscrit, a contribué aux mesures CCD de luminosité du ciel, a analysé les statistiques, et a effectué le calcul avec logiciel. P.C. a développé le modèle de propagation de la pollution lumineuse et a écrit le logiciel pour calculer la luminosité du ciel. Christopher C. M. Kyba (C.C.M.K.), a compilé les mesures SQM et étalonné les cartes utilisant ces dernières et d'autres ensembles de données. Dan Duriscoe (D.D.) a contribué à l'étalonnage de la luminosité du ciel, et au final, a réalisé et assemblé les cartes, et a dirigé la collecte des mesures CCD de luminosité du National Park Service des Etats-Unis. Christopher D. Elvidge (C.D.E.), et Kimberly Baugh (K.B.), ont collecté et rassemblé les données satellitaires d'émission lumineuse nocturne vers le haut. Boris A. Portnov et Nataliya A. Rybnikova (N.A.R.), ont effectué les calculs statistiques. Riccardo Furgoni (R.F.), a effectué le calcul informatique. F.F. et R.F. ont effectué l'analyse statistique réalisée avec les données de population et de surface des territoires. C.C.M.K., D.D., K.B., et B.A.P., ont écrit certaines parties du manuscrit. F.F., D.D., C.C.M.K. et R.F. ont réalisé les figures. Tous les auteurs ont lu et commenté le manuscrit. **Conflit d'intérêts** : Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts. **Disponibilité des données et documents** : Toutes les données nécessaires pour évaluer les conclusions de ce document sont présentes dans celui-ci. D'autres données sur les mesures de luminosité du ciel nocturne liées au présent document peuvent être demandées en écrivant au premier auteur ou soit consulter les documents sur le site Internet : <http://doi.org/10.5880/GFZ.1.4.2016.001> (35) ou bien, ceux suivants : données F. Giubbilini : Buiometria Partecipativa project - Projet participatif de mesure de la pollution lumineuse ([buiometria@attivarti.org](mailto:buiometria@attivarti.org)); Données RASC : [http://old.rasc.ca/~admin/sqm/SQM\\_data\\_view.php](http://old.rasc.ca/~admin/sqm/SQM_data_view.php); Données de la Catalogne : [darksky@parcastronomic.cat](mailto:darksky@parcastronomic.cat); Données de Espey/Owens : [Brian.Espey@tcd.ie](mailto:Brian.Espey@tcd.ie) et [steve@owens-online.co.uk](mailto:steve@owens-online.co.uk); Données de Haenel/Frank : [ahaenel@uos.de](mailto:ahaenel@uos.de); Données de Madrid : <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.51713>; Données de Globe at Night : <http://www.globeatnight.org/>; Données d'Unihedron : <http://www.unihedron.com/projects/darksky/database/>; et Données de l'IDSP : J. Barentine ([john@darksky.org](mailto:john@darksky.org)).