

Le premier atlas mondial de la clarté artificielle du ciel nocturne

P. Cinzano^{1†}, F. Falchi^{1†}, et C. D. Elvidge²,

¹ Dipartimento di Astronomia, Università di Padova, vicolo dell'Osservatorio 5, I-35122 Padova, Italy

² Office of the Director, NOAA National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder CO 80303

Accepté pour publication dans les "Royal Astronomical Society Monthly Notices" le 1 août 2001, reçu le 24 juillet 2001

En forme originelle le 18 décembre 2000

Traduction terminée le 18 septembre 2001

Dernière mise à jour le 14 décembre 2001

Notes importantes concernant ce document

Ceci est une traduction de l'anglais réalisée par Alexis Bosson¹ et Mireille Sanchez Arias² pour l'Association Nationale pour la Protection du Ciel Nocturne³ avec l'aimable autorisation des auteurs.

Cette traduction a été réalisée dans un but strictement informatif afin de permettre aux lecteurs francophones d'accéder à cet Atlas. En aucun cas, cette traduction ne saurait remplacer le document original, dont la rigueur scientifique assure l'exactitude des termes employés, qui peuvent avoir été incorrectement transcrits dans le présent document, malgré les soins apportés.

Nous invitons donc le lecteur à consulter le document original "The First World Atlas of the artificial night sky brightness" ainsi que les cartes à haute résolution sur le site internet du professeur Pierantonio Cinzano :

<http://www.lightpollution.it/worldatlas/>

Résumé

Nous présentons le premier Atlas Mondial de la clarté artificielle du ciel nocturne, au zénith, convertie au niveau de la mer. Basé sur les données étalonnées du rayonnement prises à haute résolution par le satellite DMSP et sur la modélisation précise de la propagation de la lumière dans l'atmosphère, il fournit une représentation presque mondiale de la façon dont l'humanité est en train de s'envelopper dans un brouillard lumineux. En comparant l'Atlas avec la base de données de la densité de population du Ministère de l'Énergie Américain ("U.S. Department of Energy = DOE") nous avons déterminé la fraction de la population vivant sous un ciel d'une certaine clarté. Environ deux tiers de la population mondiale et 99% de la population des États-Unis (hors Alaska et Hawaï) et de l'Union Européenne vivent dans des régions où le ciel nocturne dépasse le seuil fixé pour le statut de ciel pollué. En considérant une acuité visuelle moyenne, environ un cinquième de la population mondiale, plus des deux tiers de la population des États-Unis et plus de la moitié de la population de l'Union Européenne ont déjà perdu la visibilité à l'œil nu de la Voie Lactée. Enfin, environ un dixième de la population mondiale, plus de 40% de la population des États-Unis et un sixième de la population de l'Union Européenne voient les cieux sans que leurs yeux aient besoin de s'adapter à la vision nocturne à cause de la clarté du ciel.

*E-mail : cinzano@pd.astro.it, cinzano@lightpollution.it

†also at the Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso (ISTIL), Thiene, Italy

¹E-mail : alexis.bosson@libertysurf.fr

²E-mail : sanchar@club-internet.fr

³Site web : <http://www.astrosurf.com/anpcn/>

1 Introduction

L'une des altérations de la nature qui s'accroît le plus rapidement est la dégradation du niveau de clarté nocturne produite par la lumière artificielle. L'étude du changement mondial doit prendre en considération ce phénomène appelé "pollution lumineuse". Les effets nocifs de la pollution lumineuse constatés concernent le règne animal, le règne végétal et l'humanité (voir par ex. Cinzano 1994 pour une liste de références). De plus, l'augmentation de la clarté nocturne due à la pollution lumineuse provoque une perte de la perception de l'Univers dans lequel nous vivons (voir par ex. Crawford 1991 ; Kovalevsky 1992 ; McNally 1994 ; Isobe & Hirayama 1998 ; Cinzano 2000d ; Cohen & Sullivan 2001). Ceci peut avoir des effets inattendus sur le futur de notre société. En fait, le ciel nocturne, qui constitue le panorama de l'Univers environnant, a toujours eu une forte influence sur la pensée et la culture humaines, de la philosophie à la religion, de l'art à la littérature en passant par la science.

La préoccupation au sujet de la pollution lumineuse a augmenté dans de nombreux domaines scientifiques, migrant du cadre traditionnel de l'astronomie vers la physique atmosphérique, les sciences environnementales, les sciences naturelles et même les sciences humaines. L'étendue mondiale et les implications du problème n'avaient jusqu'à présent pas été abordées à cause du fait qu'il n'y avait pas de données à grande échelle sur la répartition et l'ampleur de la clarté artificielle du ciel nocturne.

La clarté du ciel nocturne au zénith au niveau de la mer est un précieux indicateur des effets de la pollution lumineuse sur le ciel nocturne, et de la quantité de lumière artificielle contenue dans l'atmosphère. Les cartes de celle-ci au niveau de la mer, dégagées des effets de l'altitude, sont utiles pour comparer des niveaux de pollution à travers de grands territoires, pour reconnaître les régions les plus polluées ou les villes les plus polluantes et pour identifier les zones sombres (Cinzano et coll. 2000a, ci-après "Article 1"). Même si la capacité de perception de l'Univers est mieux montrée par des cartes spécifiques de la visibilité stellaire, qui rendent compte de l'altitude et de l'extinction atmosphérique (Cinzano et coll. 2000b, ci-après "Article 2"), les cartes de la clarté artificielle du ciel zénithal au niveau de la mer fournissent une évaluation statistique raisonnable de la visibilité de la Voie Lactée et une comparaison avec des niveaux typiques de clarté naturelle. L'atlas au niveau de la mer est également un point de départ raisonnable dans l'étude mondiale de la pollution lumineuse étant donné que de grandes quantités de population sont concentrées à de basses altitudes.

Jusqu'à présent aucune représentation mondiale, quantitative et précise de la clarté artificielle du ciel nocturne n'était disponible pour la communauté scientifique et les gouvernements. Des mesures au sol de la clarté du ciel sont disponibles uniquement pour un nombre limité de sites, principalement des observatoires astronomiques, et sont réparties sur beaucoup d'années différentes. La pénurie d'observations au sol rend impossible la réalisation de cartes mondiales depuis cette source.

Une approche pour modéliser la distribution spatiale de la clarté artificielle du ciel nocturne est de la prévoir en fonction de la densité de la population, puisque les régions à forte population produisent d'ordinaire des niveaux plus élevés de pollution lumineuse et, en conséquence, une plus grande clarté artificielle du ciel (rougeoisement du ciel). Pourtant (i) la proportionnalité apparente entre la population et le rougeoisement du ciel s'effondre en allant de grandes échelles à de plus petites échelles, et en y regardant plus précisément, en raison de la propagation atmosphérique de la pollution lumineuse à des longues distances de leurs sources, (ii) la lumière ascendante n'est pas toujours proportionnelle à la population (e.g. à cause des différents développements et des pratiques d'éclairage), (iii) certaines sources polluantes ne sont pas représentées dans les données de population (e.g. les sites industriels et les torchères pétrolières) et (iv) les données de recensements de la population ne sont pas collectées en utilisant des techniques, des calendriers ou des éléments administratifs de notation uniformisés dans le monde entier.

En remplacement, nous avons utilisé une carte mondiale des rayonnements dans la haute atmosphère des sources lumineuses d'origine humaine, réalisée grâce aux données du "Système à Balayage Linéaire Opérationnel" du "Programme Satellitaire Météorologique de Défense de l'US. Air Force" ("U.S. Air Force Defense Meteorological Satellite Program" (DMSP) "Operational Linescan System" (OLS)) pour modéliser la clarté artificielle du ciel. Des années 1972-92, seules des données sur film étaient disponibles du programme DMSP-OLS. Sullivan (1989, 1991) a réussi à produire une carte mondiale des sources lumineuses en utilisant les données filmées, mais cette réalisation n'a pas distingué les sources lumineuses persistantes des villes et les lumières éphémères d'événements tels que les incendies. Au milieu des années 1990 Elvidge et coll. (1997a,b,c) ont produit un composé mondial sans nuage des lumières en utilisant une série d'observations nocturnes du DMSP, identifiant les lieux de sources lumineuses persistantes. Cette utilisation potentielle des "lumières stables" pour les études de la pollution lumineuse avait été constatée par Isobe et Hamamura (1998). Plus récemment, une carte mondiale étalonnée de l'éclat des sources de lumière d'origine humaine a été réalisée en utilisant les données du DMSP-OLS recueillies à un faible niveau de gain. (Elvidge et coll. 1999). Une fois la localisation et le rayonnement en haute atmosphère cartographiés, le temps était venu de modéliser la clarté artificielle du ciel au niveau de la surface du globe terrestre.

La première exploitation de ces données pour estimer la clarté artificielle du ciel a été réalisée en appliquant les simples lois de la propagation de la pollution lumineuse aux données du satellite (Falchi 1998 ; Falchi & Cinzano 2000). Par la suite nous avons présenté une méthode pour cartographier la clarté artificielle du ciel (Article 1) et la visibilité stellaire à l'œil nu (Article 2) au travers de grands territoires, en calculant la propagation de la lumière au sein de l'atmosphère en utilisant les détaillés "Modèles de Garstang" (Garstang 1984, 1986, 1988a, 1989b, 1991, 2000 ; voir aussi Cinzano 2000a,b). Nous présentons ici le pre-

mier Atlas Mondial de la clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer. Il a été obtenu en appliquant la méthode explicitée dans l'Article 1 aux données étalonnées mondiales du rayonnement, provenant du satellite à haute résolution DMSP. Dans la section 2 nous avons résumé les grandes lignes de la méthode, en section 3 nous présentons l'Atlas et une comparaison avec les mesures au sol, en section 4 nous présentons les résultats statistiques et les tableaux basés sur une comparaison avec la base de données de densité de population du Landsat 2000 DOE (Dobson et coll. 2000) et en section 5 nous dressons nos conclusions.

2 Grandes lignes de la méthode

Nous résumons ici les méthodes utilisées pour produire l'Atlas Mondial. Nous invitons les lecteurs à lire l'Article 1 et l'Article 2 pour des explications plus détaillées.

Les données à haute résolution des flux ascendants ont été calculées à partir des rayonnements observés par l'OLS embarqué dans les satellites DMSP. L'OLS est un radiomètre à balayage oscillatoire capable de faire de l'imagerie à amplification de lumière et à infrarouge thermique. (TIR = Thermal InfraRed) (Lieske 1981). La nuit, l'OLS utilise un Tube Multiplicateur Photographique (PMT = Photo Multiplier Tube), relié à un télescope de 20 cm, pour intensifier le spectre lumineux visible. Il a une large réponse spectrale de 440 à 940 nm avec une sensibilité accrue dans la région située entre 500 et 650 nm, couvrant la gamme d'émissions principales des lampes les plus utilisées pour l'éclairage extérieur : Vapeur de Mercure (545 nm à 575 nm), Sodium Haute Pression (de 540 nm à 630 nm) et Sodium Basse Pression (589 nm). Nous avons utilisé une carte mondiale des rayonnements produite en utilisant les données recueillies durant 28 nuits en 1996-97 à des niveaux de gain réduits, pour éviter la saturation dans les centres urbains. La carte mondiale est un composite "sans-nuage", ce qui signifie que seules des observations sans nuage ont été utilisées. La carte fait état du rayonnement observé à partir de l'ensemble des observations sans nuage. Les lumières éphémères produites par des incendies et des événements polluants aléatoires ont été enlevées en supprimant les lumières apparaissant au même endroit moins de trois fois. Les flux ascendants étalonnés par unité d'angle fixe vers le satellite ont été obtenus à partir des données du rayonnement basées sur un étalonnage du rayonnement sur un vol préparatoire de l'OLS-PMT. L'étalonnage a été testé avec des mesures au sol dans l'Article 1. Le flux ascendant par unité d'angle solide dans d'autres directions a été estimé sur la base d'une fonction d'émission normalisée moyenne, en accord avec une étude du flux ascendant par unité d'angle solide par habitant sur un grand nombre de villes à différentes distances par le satellite nadir.

La propagation de la pollution lumineuse est calculée avec les techniques de modélisation de Garstang en tenant compte de la dispersion de Rayleigh par les molécules, de la dispersion de Mie par les aérosols, de l'absorption atmosphérique sur les trajectoires des lumières et de la rontondité de la Terre.

Nous avons négligé les dispersions de troisième ordre et plus, qui ne sont significatives que pour des performances optiques supérieures aux nôtres. Nous avons associé les estimations à des paramètres bien définis apparentés à la teneur en aérosol, ainsi les conditions atmosphériques, que les estimations nécessitent, sont bien connues. Les conditions atmosphériques sont variables et une évaluation soignée de la condition atmosphérique "typique" dans la nuit dégagée "typique" locale de chaque endroit est plutôt difficile, en partie à cause de la difficulté de la définir, donc nous avons utilisé le même modèle atmosphérique partout, correspondant à une atmosphère dégagée standard (Garstang 1986, 1989 ; Article 1 ; Article 2). Ceci évite également la confusion entre les effets dus à la pollution lumineuse et les effets dus aux variations géographiques des conditions atmosphériques des nuit "typiques". Étant plus intéressés par la comparaison et la compréhension des distributions de la pollution lumineuse que par l'estimation de la clarté effective du ciel pour l'observation, nous avons calculé la clarté artificielle du ciel au niveau de la mer, afin d'éviter les effets de l'altitude dans nos cartes. Les lecteurs doivent prendre en compte ces différences lors de l'interprétation des résultats de l'Atlas et des statistiques associées.

3 Résultats

L'Atlas Mondial de la Clarté Artificielle du Ciel Nocturne au Niveau de la Mer a été calculé pour la bande V photo-astrométrique, au zénith, pour une atmosphère dégagée avec un coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$, où K est un coefficient de mesure de la teneur en aérosol de l'atmosphère (Garstang 1986), correspondant à une extinction verticale d'une magnitude $\Delta m = 0.33$ dans la bande V, une visibilité horizontale de $\Delta x = 26$ km et une profondeur optique $\tau = 0.3$. Les cartes de chaque continent sont présentées en figures 1 à 8 en projection latitude/longitude. Les cartes originales à haute résolution de l'Atlas Mondial sont téléchargeables en tant que fichiers TIFF "zippés" sur le site internet <http://www.lightpollution.it/dmsp/>. Elles ont été obtenues à partir d'une mosaïque des cartes originelles dont les pixels couvrent $30'' \times 30''$. Chaque niveau cartographique est trois fois plus grand que le précédent. Les niveaux cartographiques correspondent aux clartés artificielles du ciel (entre parenthèses les couleurs respectives) en $V \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$: $9.47 \cdot 10^6 - 2.84 \cdot 10^7$ (bleu), $2.84 \cdot 10^7 - 8.61 \cdot 10^7$ (vert), $8.61 \cdot 10^7 - 2.58 \cdot 10^8$ (jaune), $2.58 \cdot 10^8 - 7.75 \cdot 10^8$ (orange), $7.75 \cdot 10^8 - 2.32 \cdot 10^9$ (rouge), $> 2.32 \cdot 10^9$ (blanc), ou en $\mu\text{cd/m}^2$: 27.7-83.2 (bleu), 83.2-252 (vert), 252-756 (jaune), 756-2268 (orange), 2268-6804 (rouge), >6804 (blanc)(basé sur la conversion de Garstang 1986, 1989). Pour le niveau gris sombre lisez ci-après. Les niveaux cartographiques peuvent être exprimés plus intuitivement comme des ratios entre la clarté artificielle du ciel et la clarté naturelle de référence. La clarté naturelle du ciel nocturne dépend de la position géographique, de l'activité solaire, du temps entre le coucher du soleil et l'observation (voir par exemple l'Article 2), en conséquence nous appliquons les niveaux cartographiques à une clarté na-

turelle moyenne du ciel nocturne dans la basse atmosphère de $b_n = 8.61 \cdot 10^7 \text{ V ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, correspondant environ à $21.6 \text{ V mag/arcsec}^2$ ou $252 \mu\text{cd/m}^2$ (Garstang 1986). Dans ce cas, les niveaux cartographiques deviennent : 0.11-0.33 (bleu), 0.33-1 (vert), 1-3 (jaune), 3-9 (orange), 9-27 (rouge), >27 (blanc). Les frontières des pays sont approximatives. Afin de montrer à quelle distance des sources se propage la pollution lumineuse, nous avons coloré en gris sombre les zones où la clarté artificielle du ciel est supérieure de 1% à la clarté naturelle de référence (c.à.d. supérieure à $8.61 \cdot 10^5 \text{ V ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ ou $2.5 \mu\text{cd/m}^2$). Dans ces régions on peut considérer que le ciel nocturne n'est pas pollué au zénith, mais à des hauteurs plus faibles la pollution pourrait ne pas être négligeable, et un accroissement incontrôlé de la pollution lumineuse toucherait jusqu'au zénith. On ne doit considérer ce niveau que comme un ordre d'idées car de faibles différences de conditions atmosphériques peuvent produire des écarts importants lorsque le gradient de lumière artificielle est petit.

La résolution de l'Atlas ne correspond pas directement à la taille des pixels DMSP-OLS. Le véritable champ en temps réel (EIFOV) de l'OLS-PMT est plus grand que l'échantillonnage par pixel de la distance au sol gérée par le scan sinusoïdal de suivi de l'OLS et l'échantillonnage électronique du signal de chaque ligne de scan. D'ailleurs, les données originales ayant été "adoucies" à bord par un lissage de blocs de 5x5 pixels, le résultat correspond à une distance au sol de 2,8 km. Pendant le repérage géographique les pixels couvrent généralement des grilles de 30 secondes d'arc, qui sont composites pour générer la seconde grille mondiale de 30 secondes d'arc. Cependant, étant donné que la clarté du ciel résulte souvent de l'apport de nombreuses sources distantes, la plus basse résolution des données du flux vers le ciel ne joue pas, et la résolution de la carte correspond surtout à la grille de 30 secondes d'arc qui couvre à l'équateur 0,927 km.

Les données satellitaires montrent également les lumières produites en mer sur les lieux de production de pétrole et de gaz (visibles par exemple en Mer du Nord, Mer de Chine et Golfe), d'autres lueurs issues d'embranchements de gaz naturel (par exemple au Nigéria), et les lumières des flottes de pêche (par exemple près des côtes d'Argentine, dans la mer du Japon et près de la Malaisie). Leurs émissions de lumières vers le ciel diffèrent probablement de la moyenne des émissions de l'éclairage urbain, par conséquent les estimations concernant leurs conséquences sont un peu incertaines. La présence de neige pourrait également fausser les données (voir Document n° 1) c'est pourquoi nous n'avons pas retenu les territoires près des pôles.

Les différences de niveaux pour l'Europe sur la figure 3, basées sur la calibration du rayonnement lors du vol préparatoire de l'OLS PMT et concernant 1996-1997, ainsi que sur les figures 11 et 12 du Document 1, basées sur les calibrations terrestres et relatives à 1998-1999, concordent avec l'accroissement annuel de la pollution lumineuse mesurée en Europe (voir par exemple Cinzano 2000c) mais ne peuvent être retenues comme significatives à cause de l'incertitude de la méthode.

En figure 7 nous présentons une comparaison entre

les cartes d'estimations et les mesures terrestres sur le ciel. Le tableau de gauche compare les cartes d'estimations aux mesures de l'éclairage artificiel du ciel dans la basse atmosphère, réalisées par nuits pures ou photométriques dans la bande V pour l'Europe (carrés pleins), Amérique du Nord (triangles) Amérique du Sud (losanges), Afrique (triangles pleins) Asie (cercles pleins) (Catanzaro & Catalano 2000 ; Della Prugna 2000 ; Falchi 1998 ; Favero et coll. 2000 ; Massey & Foltz 2000 ; Nawar et coll. 1998 ; Nawar et coll. 1998 ; Piersimoni et coll. 2000 ; Poretti & Scardia 2000 ; Zitelli 2000). Toutes ces mesures ont été réalisées en 1996-1997 excepté celles d'Europe réalisées en 1998-1999 et rapportées à l'échelle 1996-1997 par soustraction de 20% pour tenir compte approximativement de l'augmentation de la pollution lumineuse en deux ans. Les barres d'erreur tiennent compte des erreurs de mesures et d'une incertitude d'environ 0,1 magnitude arcsec^2 dans la clarté naturelle du ciel, qui n'est pas négligeable dans les sites non éclairés. Celles-ci sont moins importantes que les effets de fluctuation des conditions atmosphériques. Le tableau de droite montre les cartes de estimations en comparaison avec les mesures photographiques prises au Japon en 1987-1991 dans une atmosphère contenant des quantités variables d'aérosols (Kosai et coll. 1992). Elles sont calibrées pour le sommet de l'atmosphère et moyennées pour chaque site ; sont omis ceux où moins de 5 mesures ont été réalisées. Les grandes barres d'erreurs montrent l'effet des changements dans les quantités d'aérosols et dans l'extinction des étoiles de comparaison. La ligne en tirets donne la régression linéaire. Un projet mondial de l'Association Internationale pour le Ciel Noir (IDA) collecte actuellement un grand nombre de mesures précises de l'éclairage du ciel ainsi que des teneurs en aérosols, qui pourraient être précieuses pour les essais d'améliorations futures de modélisation de l'éclairage artificiel sur le ciel (Cinzano & Falchi 2000).

4 Statistiques

Nous avons comparé notre Atlas avec la base de données de densité de population mondiale Landsat 2000 DOE (Dobson et coll. 2000) qui a la même grille de 30 secondes d'arc que notre Atlas. Nous avons fait le pointage de notre Atlas avec les données du Landsat par analyse visuelle de la superposition des deux documents. Nous avons extrait des statistiques pour chaque pays, pour l'Union Européenne et pour le Monde, en tenant compte du pourcentage de population qui, à chaque niveau de notre Atlas, vit dans une atmosphère normale en terme de qualité du ciel. Puis nous avons mesuré le pourcentage de population vivant sous un ciel plus éclairé que plusieurs autres, comme décrit ci-après. Le Tableau 1 donne le pourcentage de population vivant sous un ciel plus éclairé que chaque niveau de notre Atlas durant les nuits de qualité normale, c'est à dire où les ratios entre l'éclairage artificiel et le ciel naturel de référence sont supérieurs à 0.11 (colonne 1), 0.33 (colonne 2), 1 (colonne 3), 3 (colonne 4), 9 (colonne 5), 27 (colonne 6). Le tableau montre également la fraction de population qui durant les nuits de qualité standard vivent sous

un ciel plus éclairé que certains ciels éclairés de façon typique : le seuil b_p désigne le ciel pollué (c'est-à-dire quand la clarté artificielle est supérieure de 10% à la clarté naturelle au-dessus de 45 degrés de hauteur (Smith 1979)) (colonne 7), la clarté du ciel b_{fq} mesurée avec un premier quartier de Lune dans les meilleurs sites astronomiques (par exemple Walker 1987) (colonne 8), la clarté du ciel b_m avec un premier quartier de Lune à 15 degrés de hauteur (selon Krisciunas & Schaefer 1991) et zéro pollution lumineuse (colonne 9), la clarté du ciel b_{fm} près de la Pleine Lune dans les meilleurs sites astronomiques (par exemple Walker 1987)(colonne 10) qui n'est pas tellement pire que la clarté zénithale typique au crépuscule nautique (Schaefer 1993), le seuil de visibilité de la Voie Lactée pour une capacité visuelle moyenne b_{mw} (colonne 11), le seuil de vision nocturne b_e (Garstang 1986 ; voir aussi Schaefer 1993)(colonne 12). Le Tableau 2 reprend leurs valeurs numériques..

Pour réaliser le Landscan, le DOE a collecté les données de recensement les plus fiables pour chaque pays et calculé un coefficient de probabilité de densité de population pour chaque zone de la grille couvrant 30 secondes d'arc. Le coefficient est basé sur la déclivité du terrain, la proximité des routes, la nature des terres, les lumières nocturnes et un facteur de densité urbaine (Dobson et coll. 2000). Les coefficients de probabilité servent à réaliser une répartition de la population pour toutes les cellules de la grille couvrant une unité de recensement (généralement une région). Ainsi, la répartition de population qui en résulte tient compte des mouvements diurnes et des habitudes de déplacements collectifs plutôt que de la population résidente durant la nuit. Les lecteurs doivent savoir que ces pourcentages sont à considérer comme des approximations étant donnés les débats sur les procédures de détermination des caractéristiques du Landscan, les faibles conséquences de l'altitude sur la clarté artificielle du ciel et l'origine de la distribution angulaire de la lumière à partir de sources dont l'émission moyenne est supposée normale.

Nous avons aussi déterminé la superficie de la zone correspondant à chaque niveau de notre Atlas. Le Tableau 3 présente le pourcentage de superficie de chaque pays, de l'Union Européenne, et du Monde, où la clarté du ciel est supérieure à chaque niveau de notre Atlas pendant les nuits pures normales, c'est-à-dire où les ratios entre la clarté artificielle et la clarté naturelle de référence sont supérieurs à 0,11 (colonne 1), 0,33 (colonne 2), 1 (colonne 3), 3 (colonne 4), 9 (colonne 5), 27 (colonne 6).

La figure 11 montre en blanc la surface mondiale couverte par notre Atlas où vivent 98% des populations. Nos données se réfèrent à 1996-1997 donc la clarté artificielle est probablement supérieure aujourd'hui.

5 Conclusions

L'Atlas révèle que la pollution lumineuse n'est pas confinée, comme on le croit généralement, aux pays développés, mais semble plutôt être un problème mondial affectant presque tous les pays du Monde. La si-

tuation est plus grave aux États Unis, en Europe et au Japon, comme on s'y attendait, mais le ciel nocturne semble plus sérieusement atteint que prévu.

Les pourcentages de populations présentés aux Tableaux 1 et 3 parlent d'eux-mêmes, montrant que la vision du ciel nocturne s'est sévèrement dégradée dans un grand nombre de pays. Notre Atlas se réfère à 1996-1997, donc la situation actuelle est indubitablement pire. Nous avons réalisé que plus de 99% des États Unis et de l'Union Européenne, et environ deux tiers de la population de la planète vivent dans des contrées où le ciel nocturne est au-dessus du seuil de pollution (c'est-à-dire que la clarté artificielle est supérieure de 10% à la clarté naturelle au-dessus de 45 degrés de hauteur (Smith 1979)). Dans les zones où vivent 97% des habitants des États Unis, 96% des habitants de l'Union Européenne et la moitié de la population du Monde, le ciel nocturne dans des conditions atmosphériques normales est plus éclairé que ce qui a été mesuré au premier quartier de la Lune dans les meilleurs sites astronomiques (exemple, Walker 1987). 93% de la population des États Unis, 90% de l'Union Européenne et environ 40% du Monde vivent sous un ciel au zénith plus brillant qu'il le serait avec un premier quartier de Lune à 15 degrés de hauteur (base Krisciunas & Schaefer 1991) et aucune lumière polluante. Donc ils vivent en permanence au clair de lune. Ils s'en rendent rarement compte parce qu'ils connaissent aussi le ciel de Pleine Lune, plus brillant. Nous avons aussi constaté que pour 80% de la population des États-Unis, les deux tiers de l'Union Européenne et plus d'un quart de la population mondiale, la clarté du ciel est encore plus forte que celle relevée près de la Pleine Lune dans les meilleurs sites astronomiques (exemple, Walker 1987).la "nuit" ne tombe jamais réellement pour eux parce que cette clarté est approximativement égale à celle du zénith en temps normal au crépuscule nautique (Schaefer 1993). Sur la base d'une vision moyenne, plus des deux tiers de la population des États-Unis, la moitié de l'Union Européenne et un cinquième de la population mondiale on déjà perdu la possibilité de voir la Voie Lactée, la galaxie où ils vivent. Enfin, environ 40% de la population des États-Unis, un sixième de l'Union Européenne et un dixième de la population mondiale ne peuvent même pas voir le firmament avec un regard adapté à la vision nocturne parce que sa clarté est supérieure au seuil de vision nocturne (Garstang 1986 ; voir aussi Schaefer 1993). Des données préliminaires sur le clair de lune sans Lune ont été présentées par Cinzano et coll. (2001).

Nous avons noté que Venise est la seule ville d'Italie de plus de 250000 habitants où l'observateur moyen peut voir la Voie Lactée en centre ville par une nuit claire en 1996-97. Bien que le centre historique de Venise (68000 habitants) soit noyé dans la forte lueur dégagee par la partie de la ville qui est sur la terre ferme (Mestre, pop. 189000), sa clarté artificielle moyenne est encore plus faible que dans les villes de 80000 habitants proches de Venise. Ceci est principalement dû à la douce et exceptionnelle lumière romantique de cette cité, qui doit être préservée.

De nombreuses zones que l'on croyait non polluées parce qu'elles apparaissent complètement sombres sur les images satellitaires nocturnes montrent au contraire,

dans l'Atlas, des niveaux de clarté artificielle non négligeables à cause de la pollution lumineuse reçue de l'extérieur. Souvent le ciel d'un pays s'avère pollué par des sources provenant du pays voisin. Ceci pourrait ouvrir un nouveau chapitre dans la jurisprudence internationale. Des observatoires astronomiques connus pour le taux négligeable de clarté artificielle de leur ciel s'avèrent en fait situés proches ou à l'intérieur du taux de 1% : ceci signifie que si le contrôle sérieux de la pollution lumineuse dans les zones impliquées n'est pas entrepris ils risquent de voir la qualité de leur ciel dégradée en moins de 20 ans. Les sites à l'essai pour les nouvelles générations de télescopes nécessiteront une étude précise, sur le long terme, de l'augmentation de la clarté artificielle, pour s'assurer d'avoir un ciel noir longtemps après leur installation. Un contrôle sérieux à la fois des installations d'éclairage et des nouvelles urbanisations ou développements seront nécessaires sur de grandes zones autour des sites (peut-être jusqu'à 250 km de rayon).

Nous travaillons actuellement à la préparation d'un Atlas donnant les taux d'augmentation de la pollution lumineuse, de la clarté du ciel nocturne, les fonctions mathématiques d'émission des sources (Document 1) et le taux du flux de lumière ascendante comparé à la population par zone géographique.

L'Association Internationale pour le Ciel Noir (IDA, <http://www.darksky.org>) soutient au niveau mondial l'effort de législation poursuivi dans de nombreux pays pour limiter la pollution lumineuse dans le but de protéger les observatoires astronomiques, les observatoires d'amateurs, la perception de l'Univers par les citoyens, l'environnement, et d'économiser l'énergie, les capitaux et les ressources. La Commission 50 de l'Union Astronomique Internationale ("Protection des sites existants et potentiels") travaille activement à la protection du ciel astronomique, aujourd'hui avec un Groupe de Travail spécifique ("Contrôle de la pollution lumineuse") né après le Symposium Spécial pour l'Environnement ONU-UAI "Préservation du Ciel Astronomique" qui s'est tenu à Vienne au Centre de l'Organisation des Nations Unies durant l'été 1999 (Cohen & Sullivan 2000)

Remerciements

Nous sommes reconnaissants envers Roy Garstang de l'Université JILA du Colorado pour sa gentillesse amicale dans la lecture et les remarques sur ce texte, pour ses suggestions utiles et discussions intéressantes. Nous remercions le contributeur inconnu pour nous avoir incité à étendre ce travail par des tableaux statistiques. Remerciements particuliers à l'"Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso (ISTIL), Thiene, Italy" qui a soutenu une partie de ce travail. Les auteurs remercient profondément l'U.S. Air Force de leur avoir fourni les données du DMSP utilisées pour obtenir les lumières nocturnes terrestres.

FIG. 1 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer dans le Monde. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

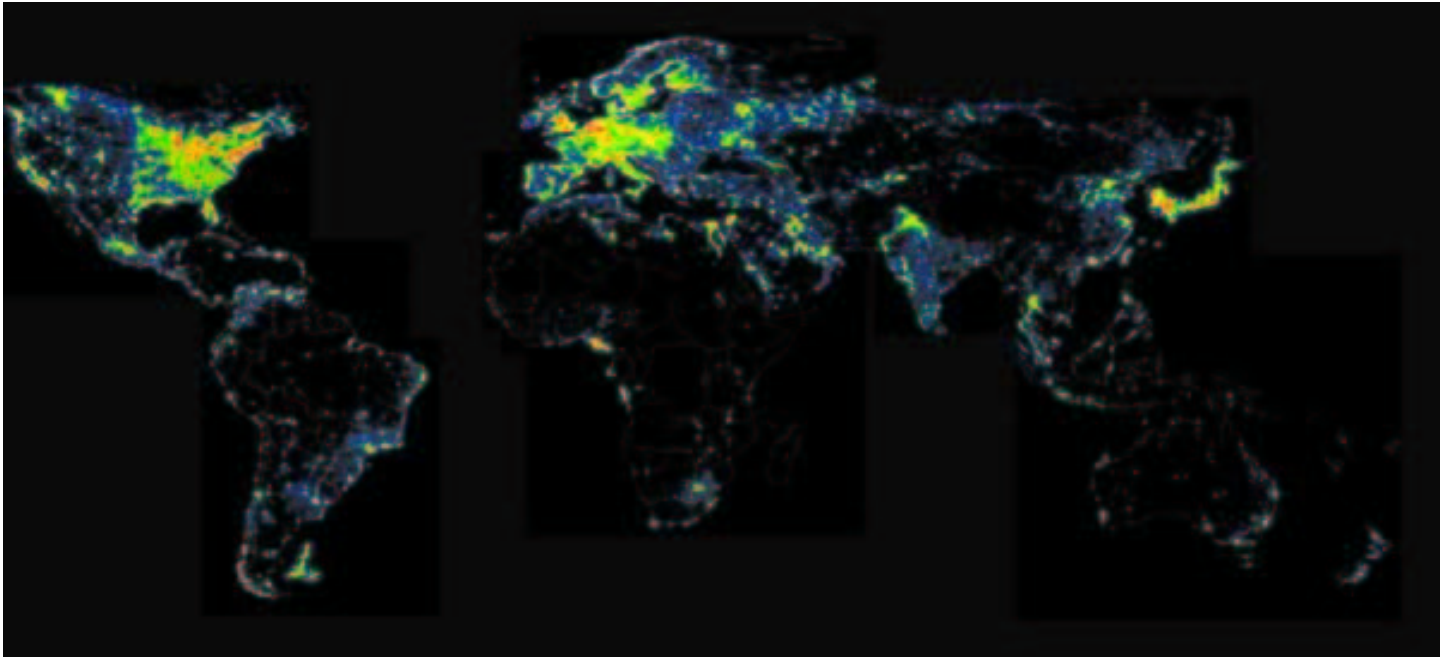


FIG. 2 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Amérique du Nord. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

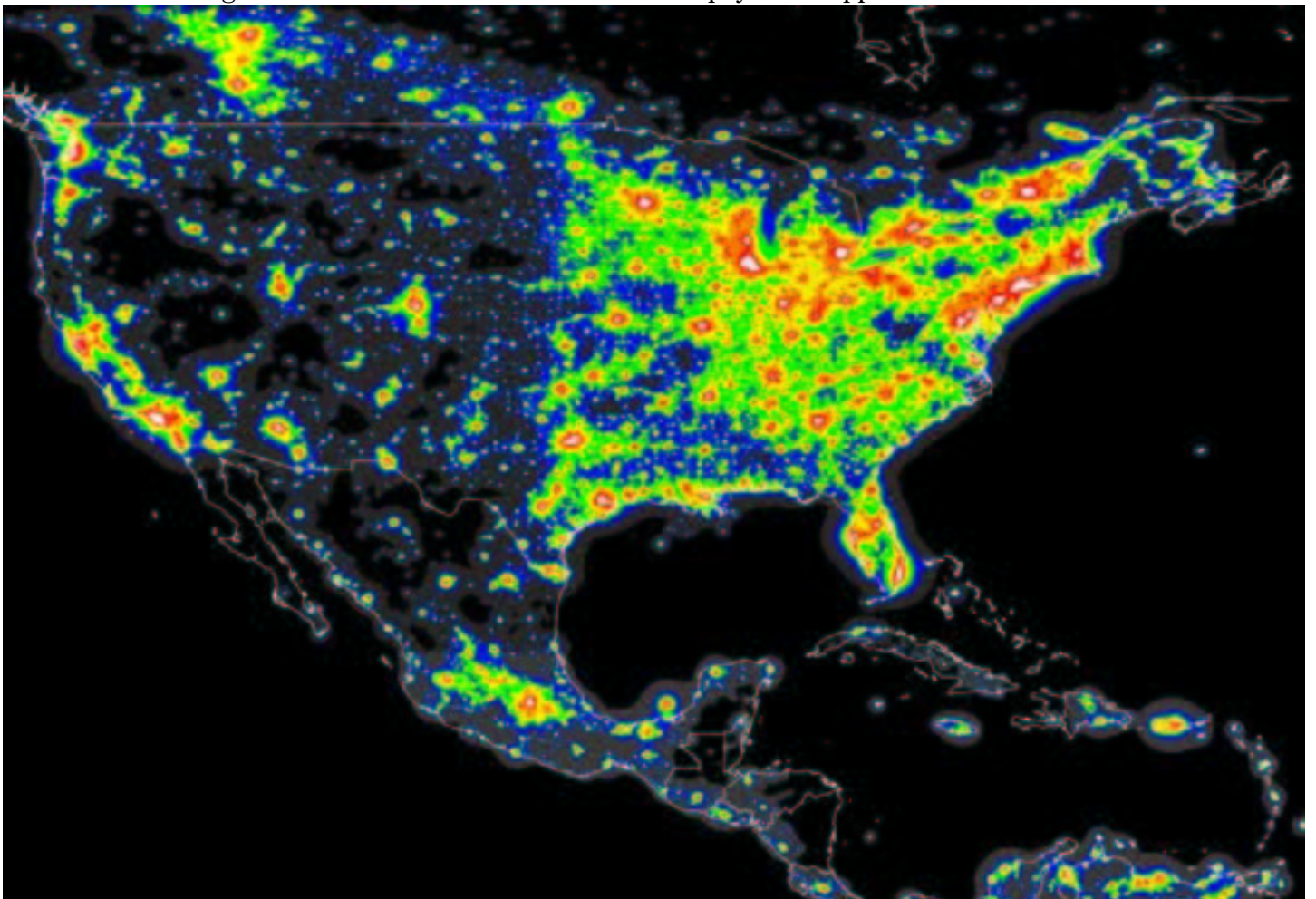


FIG. 3 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Amérique du Sud. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

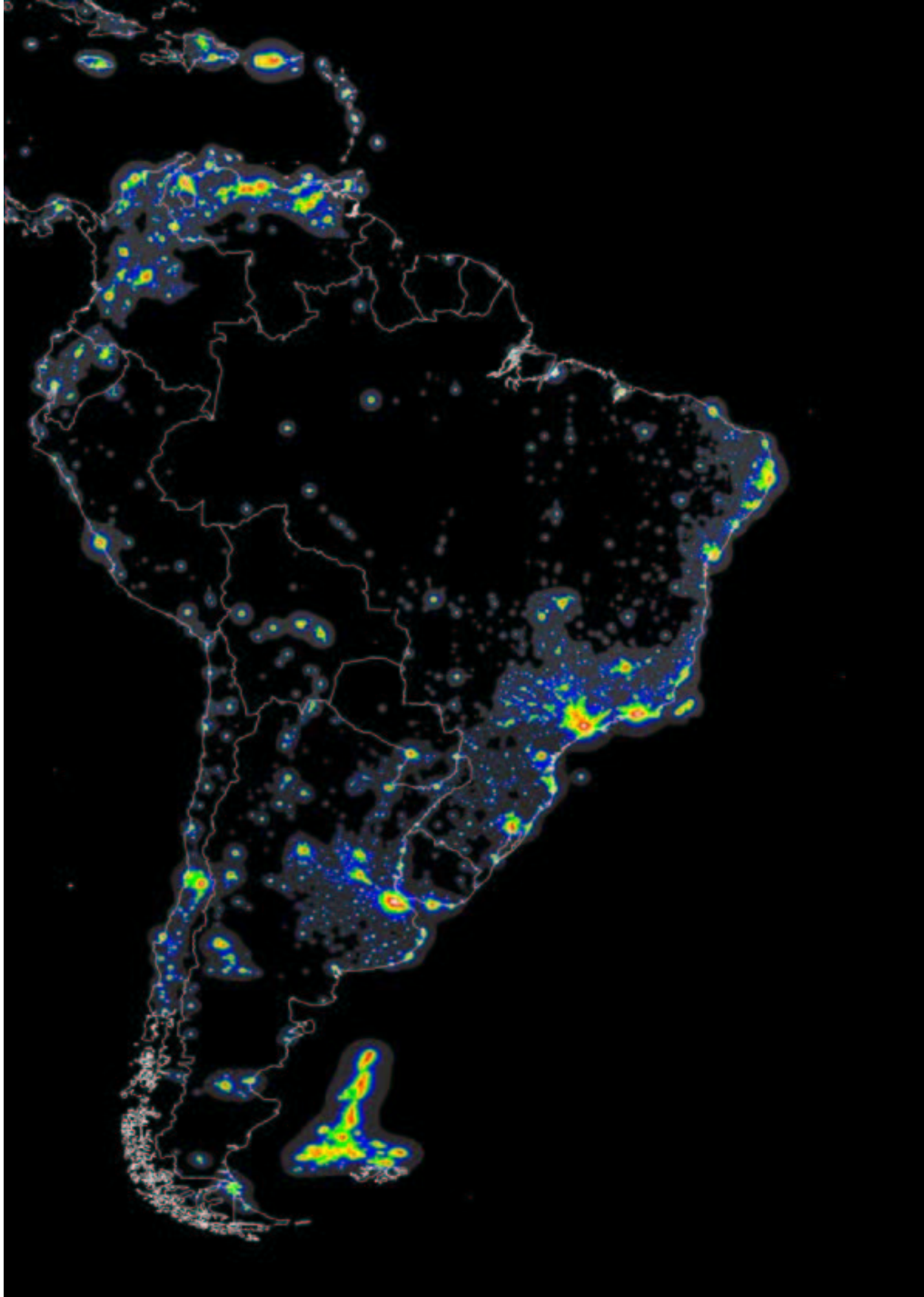


FIG. 4 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Europe. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

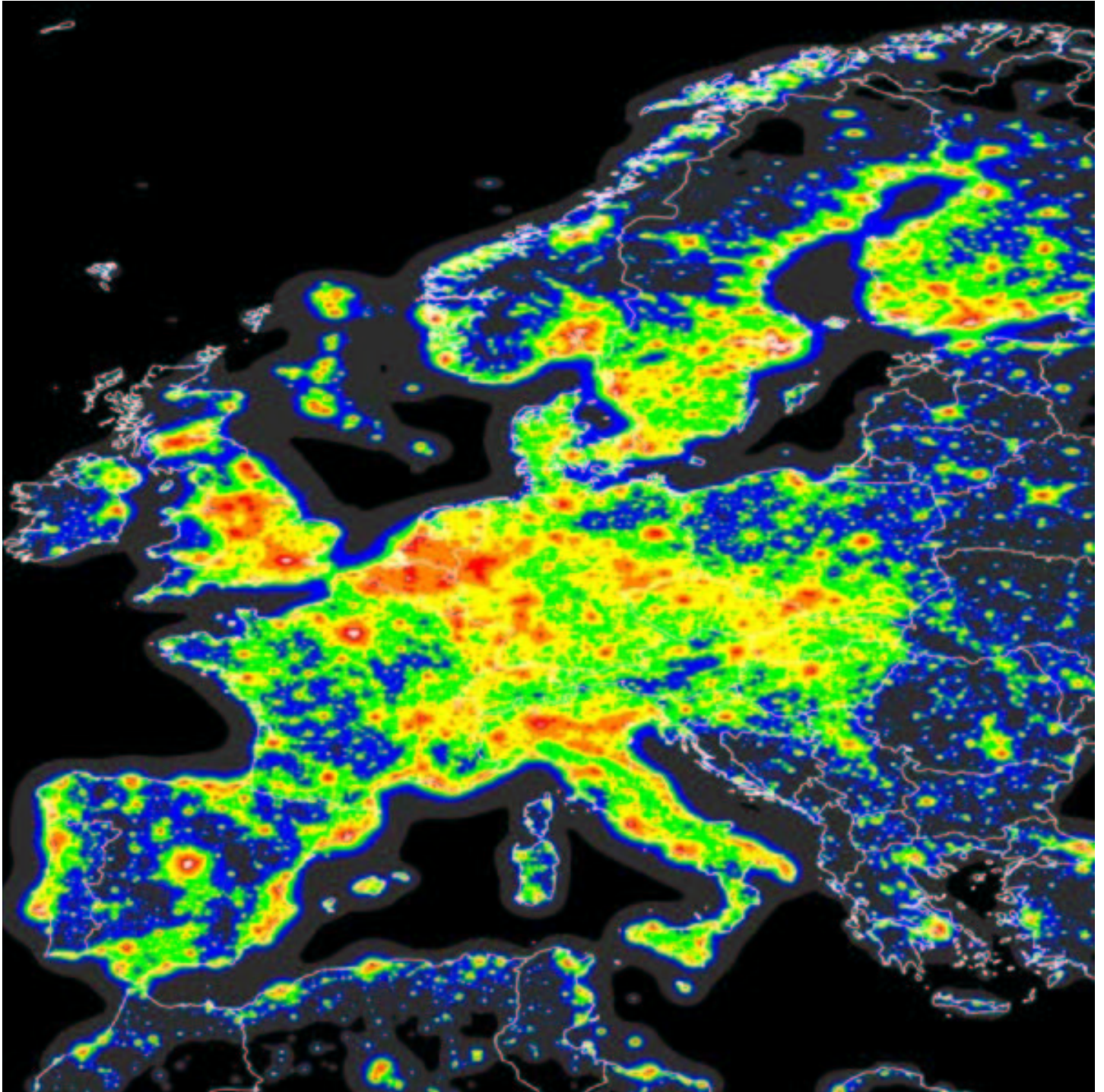


FIG. 5 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Afrique. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

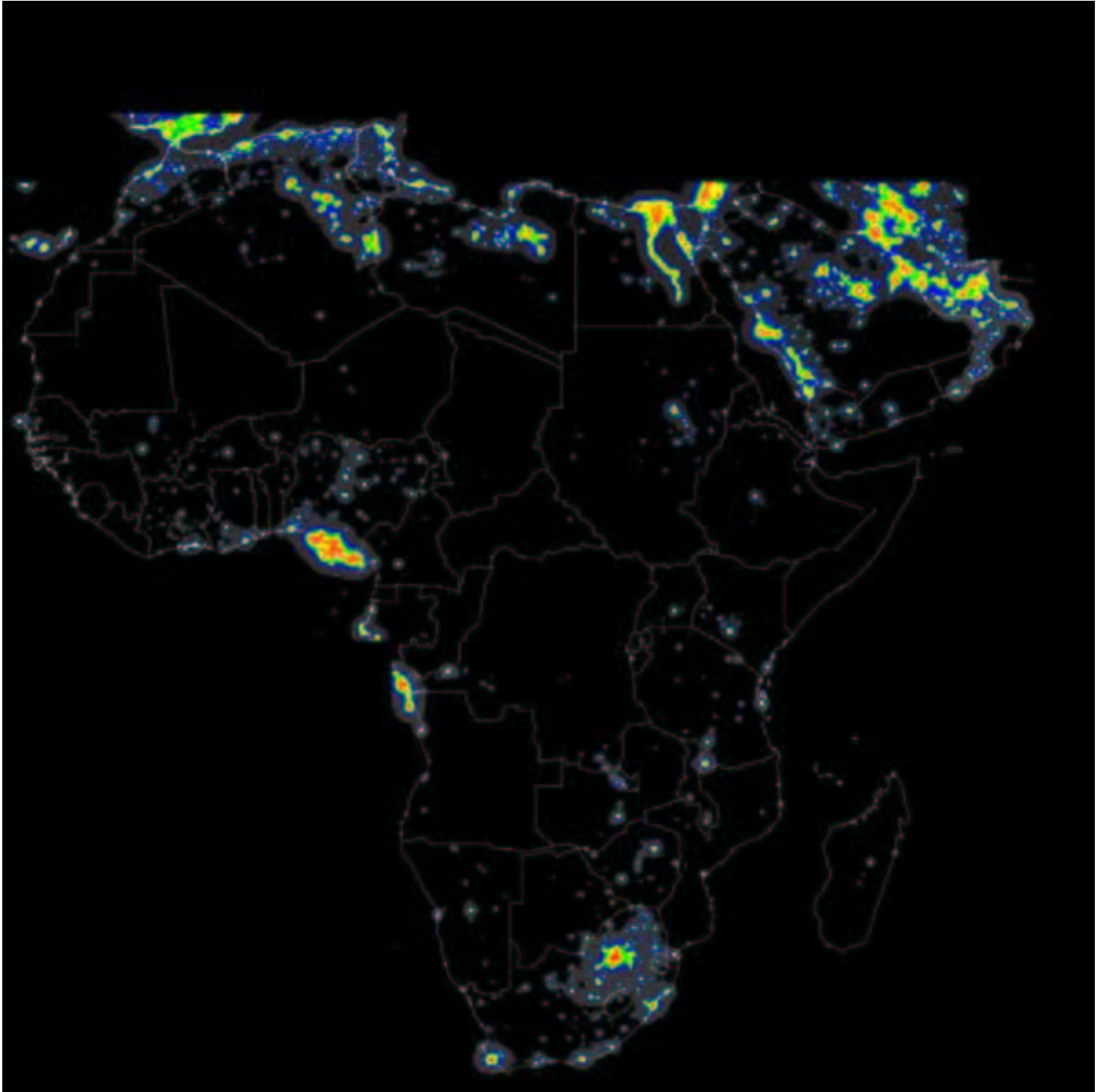


FIG. 6 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Asie Occidentale. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

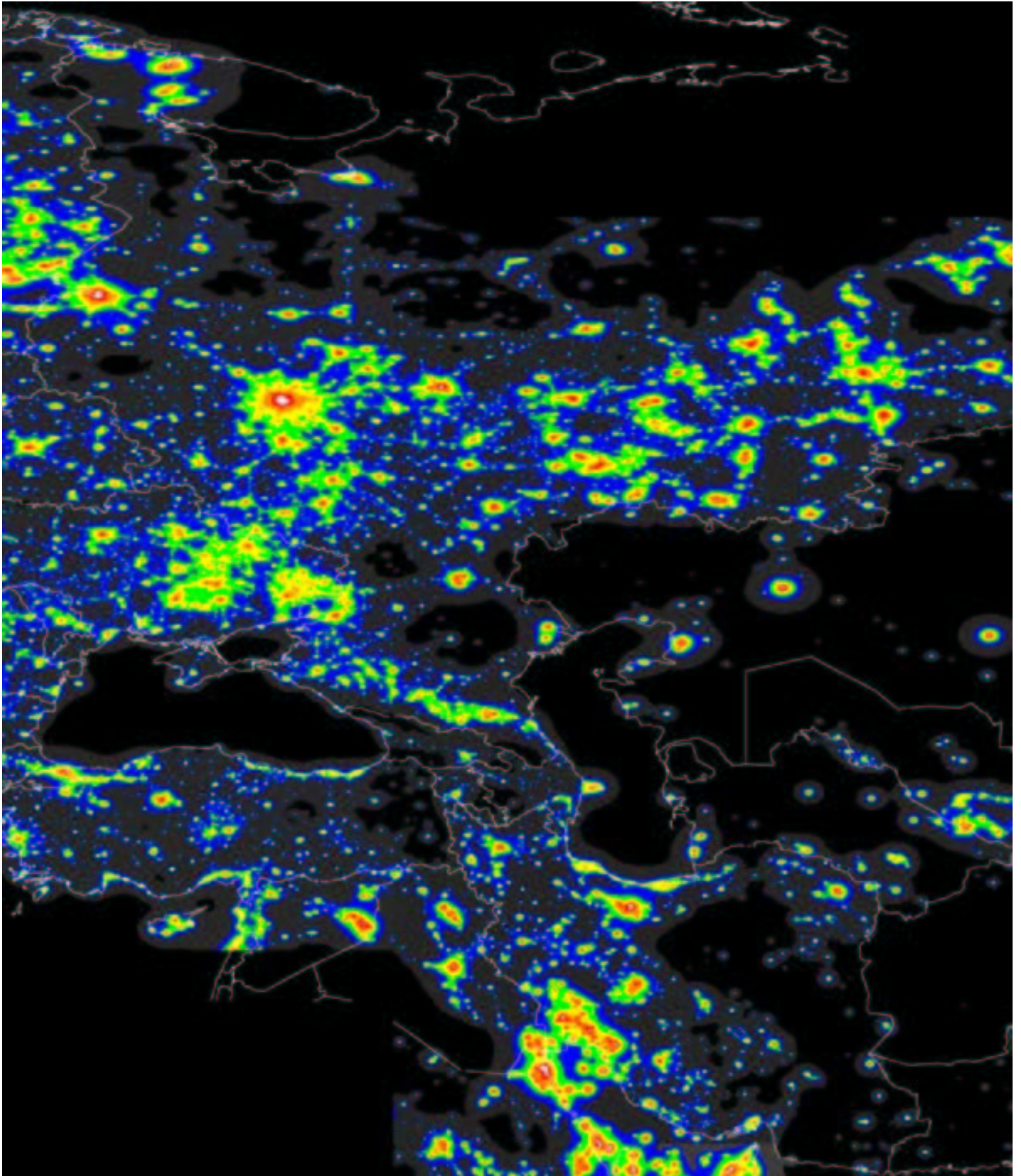


FIG. 7 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Asie Centrale. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

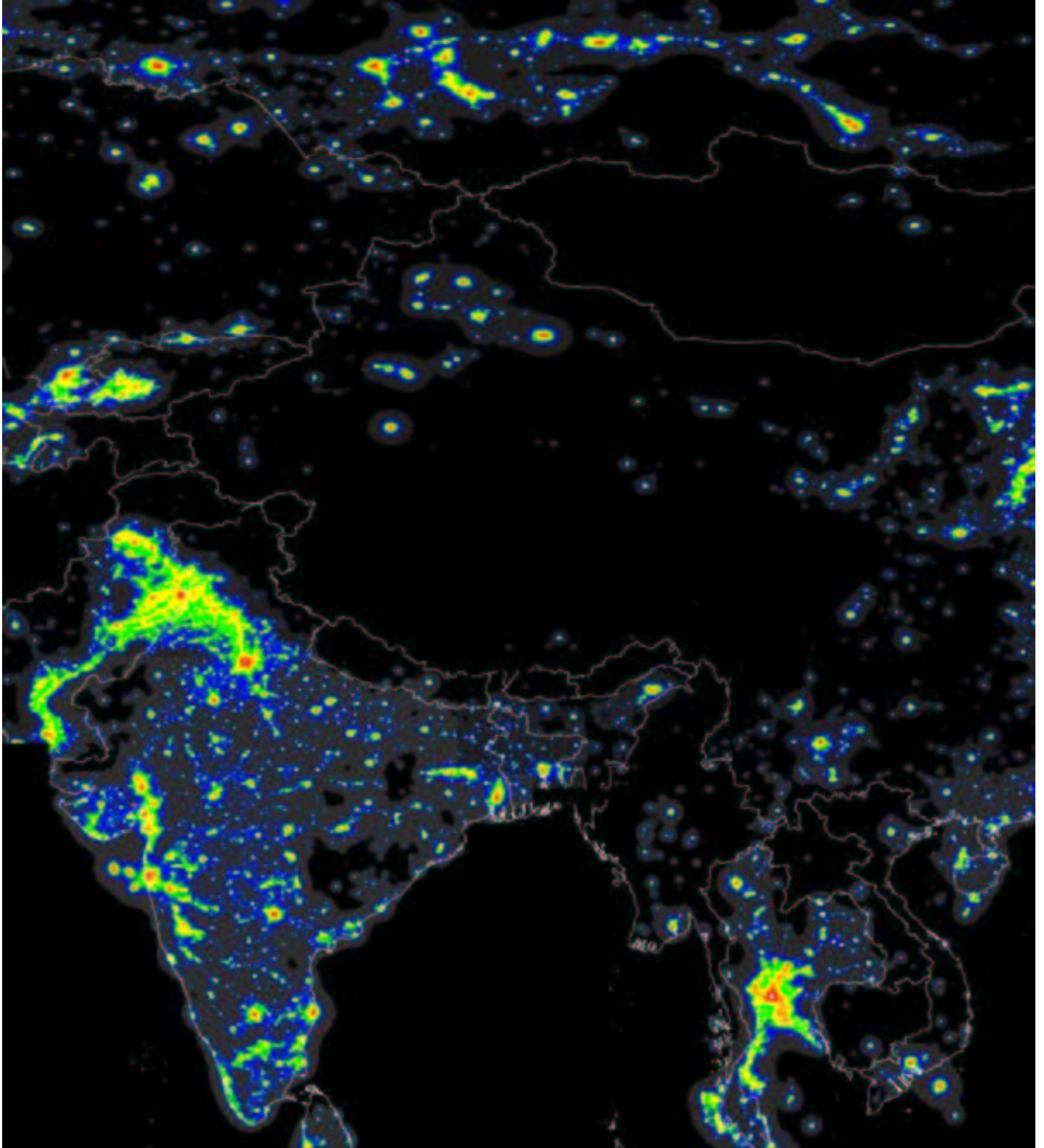


FIG. 8 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Asie Orientale. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.

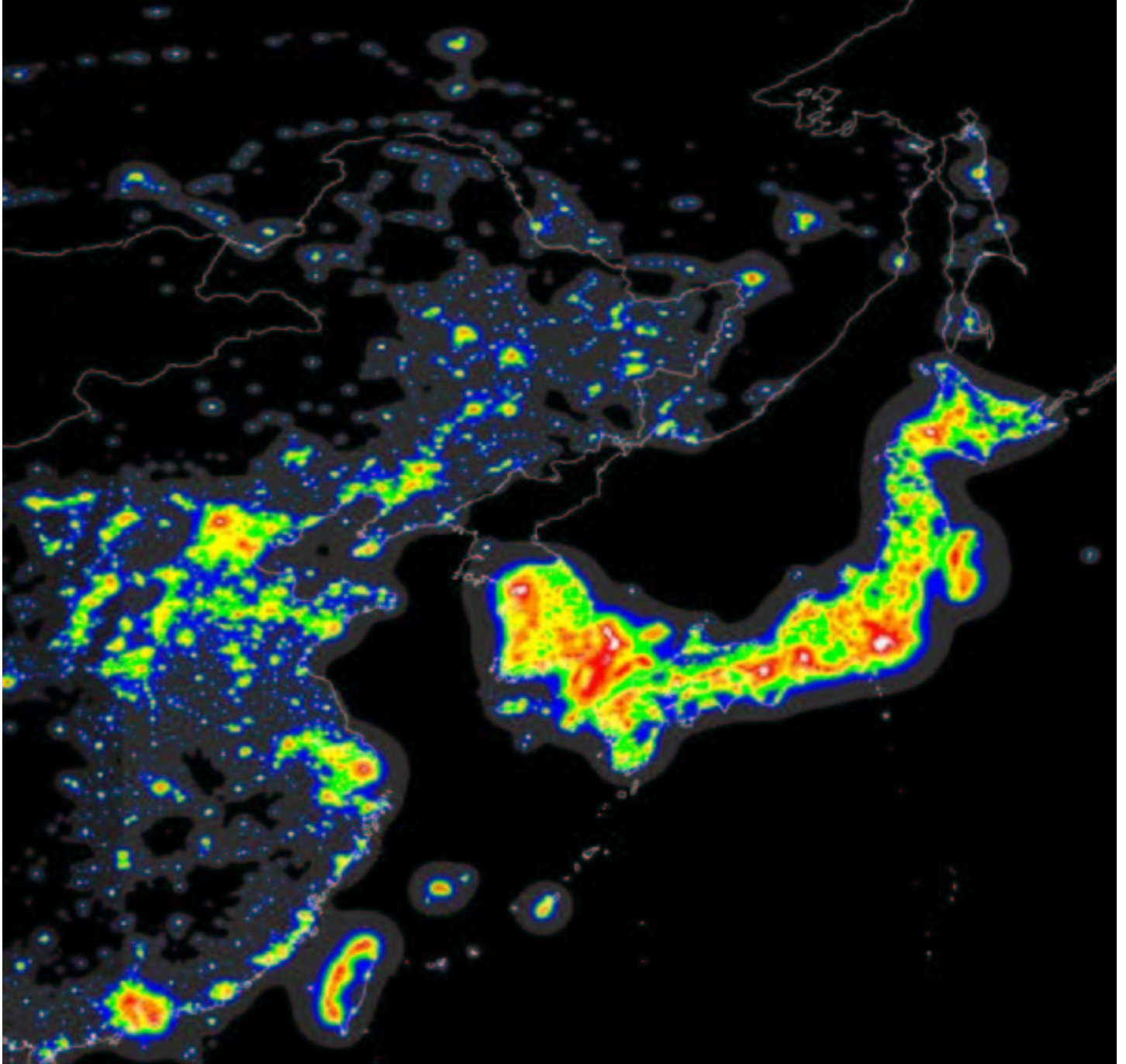


FIG. 9 – Clarté artificielle du ciel nocturne au niveau de la mer pour l'Océanie. La carte a été calculée pour la bande V astro-photométrique, au zénith, pour une atmosphère propre avec coefficient de clarté d'aérosol de $K=1$. L'étalonnage date de 1996-1997. Les frontières des pays sont approximatives.



FIG. 10 – Comparaison entre les estimations cartographiques et les mesures de la clarté artificielle du ciel nocturne. Schéma de gauche : prévisions cartographiques contre mesures de la clarté artificielle du ciel dans la basse atmosphère, prises pendant des nuits dégagées ou photométriques dans la bande V, en Europe (carrés pleins), Amérique du Nord (triangles vides), Amérique du Sud (losanges vides), Afrique (triangles pleins), Asie (cercles pleins). Schéma de droite : estimations cartographiques contre mesures photographiques, prises au Japon au cours des années 1987-1991 avec une teneur atmosphérique en aérosol variable et une moyenne pour chaque site. Les grandes barres d'erreurs montrent les effets des changements de la composition de l'atmosphère et de la variation d'éclat de l'étoile comparée. La ligne pointillée montre la régression linéaire. Les clartés du ciel nocturne sont exprimées en rayonnements de photons.

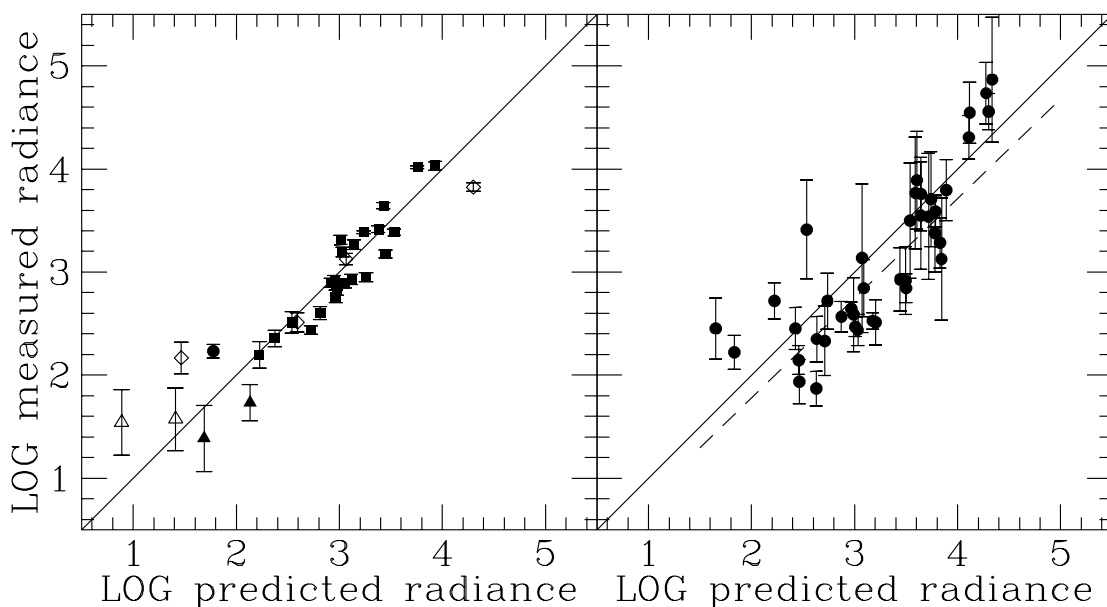


FIG. 11 – Les régions du monde couvertes par l'Atlas et les statistiques (en blanc).



Références

- [2000] Cohen J., Sullivan W.T., eds., 2001, Preserving the Astronomical Sky, UN-IAU Symp. 196, ASP Conf. Ser., San Francisco.
- [2000] Catanzaro G., Catalano F.A., 2000, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 211-220
- [2000a] Cinzano P., 2000a, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 93-112
- [2000b] Cinzano P., 2000b, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 113-130
- [2000c] Cinzano P., 2000c, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 159-166
- [2000e] Cinzano P., ed., 2000d, Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 1.
- [1994] Cinzano P., 1994, References on Light Pollution and Related Fields v.2, Internal Rep.11 Dep. of Astronomy, Padova, also on-line at www.pd.astro.it/cinzano/refer/index.htm
- [2000] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., Baugh K.E., 2000a, MNRAS, 318, 641-657 (Paper 1)
- [2000] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D. 2000b, MNRAS, 323, 34-46 (Paper 2)
- [2000] Cinzano P., Falchi F., 2000, <http://www.pd.astro.it/cinzano/misure/sbeam2.html>
- [2000] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D. 2001, Earth, Moon and Planets, 85, 517-522.
- [1991] Crawford D.L., ed., 1991, Light Pollution, Radio Interference and Space Debris, IAU Coll. 112, ASP Conf. Ser. 17
- [1999] Della Prugna F. 1999, A&AS, 140, 345-349
- [a] Dobson J.E., Bright E.A., Coleman P.R., Durfee R.C., Worley B.A., 2000, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 66, 849-858
- [1997a] Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., 1997a, Photogram. Eng. Remote Sens., 63, 727-734
- [1997b] Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., Davis, C., 1997b, Int. J. Remote Sensing, 18, 1373-1379
- [1997c] Elvidge C.D., Baugh K.E., Hobson V.H., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., Cocero D., 1997c, Global Change Biology, 3, 387-395
- [1999] Elvidge C.D., Baugh K.E., Dietz J.B., Bland T., Sutton P.C., Kroehl H.W., 1999, Remote Sens. Environ., 68, 77-88
- [2000] Elvidge C.D., Imhoff, M.L., Baugh, K.E., Hobson, V.R., Nelson, I., Dietz, J.B. 2000, J. Photogrammetry and Remote Sensing, submitted.
- [ff] Falchi F., 1998, Thesis, Univ. Milan
- [2000] Falchi F., Cinzano P., 2000, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 139-152
- [2000] Favero G., Federici A., Blanco A.R., Stagni R., 2000, in P. Cinzano, ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 223-230
- [1984] Garstang R.H., 1984, Observatory, 104, 196-197
- [1986] Garstang R.H., 1986, PASP, 98, 364-375
- [1989a] Garstang R.H., 1989a, PASP, 101, 306-329
- [1989b] Garstang R.H., 1989b, ARA&A, 27, 19-40
- [1991a] Garstang R.H., 1991, PASP, 103, 1109-1116
- [2000] Garstang R.H., 2000, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 83-92
- [1998] Isobe S., Hamamura S., 1998, in Isobe S., Hirayama, T., ed., Preserving the Astronomical Windows, Proc. IAU JD5, ASP Conf. Ser. 139, 191-199
- [1998] Isobe S., Hirayama T., eds., 1998, Preserving the Astronomical Windows, Proc. IAU JD5, ASP Conf. Ser. 139
- [1992] Kovalevsky J., ed., 1992, The Protection of Astronomical and Geophysical Sites, NATO Pilot Study n. 189, Frontières, Paris
- [a] Kosai H., Isobe S. Nakayama Y., 1992, Proc. IDA Annual Meeting 65-85
- [a] Krisciunas K., Schaefer B.E., 1991, Publ. Astron. Soc. Pacific 103, 1033-1039
- [a] Massey P., Foltz C.B., 2000, Publ. Astron. Soc. Pacific 112, 566-573
- [1994] McNally D., ed., 1994, The Vanishing Universe, Proc. IAU-ICSU-UNESCO meeting Adverse environmental impacts on astronomy, Cambridge Univ. Press, Cambridge
- [a] Nawar S., Morcos A.B., Metwally Z., Osman A.I.I., 1998, in Preserving the Astronomical Windows, S. Isobe, T. Hirayama Eds., ASP Conf. Ser. 139, 151-158
- [a] Nawar S., Morcos A.B., Mikhail J.S., 1998, Astroph. Space Science 262, 485-496
- [2000] Piersimoni A., Di Paolantonio A., Brocato E., 2000, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 221-222
- [2000] Poretti E., Scardia M., 2000, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 203-210
- [1993] Schaefer B. E., 1993, Vistas in Astronomy, 36, 311-361
- [1979] Smith F.G., 1979, Reports on Astronomy, IAU Trans., XVIIA, 218-222
- [1989] Sullivan W.T., 1989, Int. J. Remote Sensing, 10, 1-5
- [1991] Sullivan W.T., 1991, in Crawford D.L., ed., Light Pollution, Radio Interference and Space Debris, IAU Coll. 112, ASP Conf. Ser. 17, 11-17
- [a] Walker M., 1987, NOAO Newsletter 10, 16
- [2000] Zitelli V., 2000, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 193-202

TAB. 1 – Pourcentage de la population vivant sous un ciel d'une clarté supérieure aux niveaux donnés.

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$	(7) $\geq b_p$	(8) $\geq b_{fq}$	(9) $\geq b_m$	(10) $\geq b_{fm}$	(11) $\geq b_{mw}$	(12) $\geq b_e$
Afghanistan	11	8	1	0	0	0	12	8	1	0	0	0
Afrique du Sud	58	51	46	38	23	1	58	51	46	36	29	10
Albanie	50	39	27	7	0	0	53	39	27	5	0	0
Algérie	86	74	61	36	12	2	87	73	61	30	16	4
Allemagne	100	100	94	66	25	0	100	100	94	60	40	5
Andorre	100	100	100	90	0	0	100	100	100	85	48	0
Angola	16	15	14	11	7	0	16	14	14	11	10	0
Anguilla UK	100	99	51	0	0	0	100	99	51	0	0	0
Antigua et Barbuda	98	91	70	21	0	0	98	90	70	0	0	0
Antilles Néerlandaises	100	98	93	89	56	0	100	98	93	84	69	0
Arabie Saoudite	94	92	90	84	74	53	94	92	90	83	78	64
Argentine	74	71	67	59	44	23	75	70	67	58	52	29
Arménie	91	88	61	42	0	0	92	88	61	35	0	0
Australie	71	69	68	62	37	1	71	69	68	60	48	8
Autriche	100	97	82	45	21	0	100	97	82	41	29	9
Azerbaïdjan	82	76	54	29	1	0	82	75	54	27	19	0
Bahamas	84	82	81	75	58	0	85	82	81	73	66	0
Bahréïn	100	100	100	99	99	76	100	100	100	99	99	98
Bangladesh	43	29	18	8	4	0	45	29	18	8	6	0
Barbade	100	98	91	61	0	0	100	98	91	56	27	0
Belgique	100	100	100	96	52	8	100	100	100	94	76	21
Belize	31	17	6	0	0	0	34	16	6	0	0	0
Bénin	28	24	17	2	0	0	29	24	17	0	0	0
Bermudes UK	100	100	100	44	0	0	100	100	100	14	0	0
Bhoutan	10	7	0	0	0	0	10	6	0	0	0	0
Biélorussie	86	78	68	45	13	0	87	78	68	37	18	0
Bolivie	58	57	56	52	37	0	58	57	56	50	45	15
Bosnie-Herzégovine	80	61	32	0	0	0	82	60	32	0	0	0
Botswana	23	20	16	8	0	0	23	20	16	8	1	0
Brésil	66	60	55	45	29	10	66	59	55	43	36	17
Brunei	93	84	78	58	28	0	94	84	78	53	44	0
Bulgarie	84	71	53	22	1	0	86	70	53	19	8	0
Burkina Faso	7	6	5	3	0	0	7	6	5	3	0	0
Burundi	6	4	4	0	0	0	6	4	4	0	0	0
Cambodge	14	11	9	7	0	0	15	11	9	5	0	0
Cameroun	22	20	18	14	0	0	22	20	18	9	0	0
Canada	97	94	90	83	71	46	97	94	90	82	77	59
Centrafricaine (République)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chili	87	83	79	72	49	26	88	82	79	71	61	34
Chine	54	41	29	13	5	1	55	40	29	12	7	2
Chypre	98	91	83	66	36	0	98	91	83	65	56	0
Cisjordanie	100	100	100	81	37	0	100	100	100	73	51	24
Colombie	77	68	60	49	34	8	78	67	60	47	40	22
Congo	41	39	36	33	0	0	41	39	36	27	0	0
Corée du Nord	25	18	13	1	0	0	26	17	13	0	0	0
Corée du Sud	100	100	99	92	75	45	100	100	99	90	82	59
Costa Rica	80	70	64	56	39	0	81	70	64	55	50	14
Côte d'Ivoire	26	22	18	14	1	0	26	21	18	13	10	0
Croatie	96	85	67	31	15	0	96	84	67	25	17	0
Cuba	55	47	39	19	2	0	57	47	39	17	11	0
Danemark	100	97	85	53	23	0	100	97	85	50	33	3
Djibouti	24	22	21	14	0	0	25	22	21	0	0	0
Dominicaine (République)	84	74	64	48	36	0	85	74	64	45	38	16
Dominique	7	4	0	0	0	0	7	4	0	0	0	0
Égypte	100	100	99	82	33	19	100	100	99	73	43	23
El Salvador	83	71	55	38	26	0	84	70	55	35	29	5
Émirats Arabes Unis	100	100	99	97	89	67	100	100	99	97	94	78
Équateur	57	48	41	27	9	0	58	48	41	24	15	2
Érythrée	17	15	13	3	0	0	18	15	13	0	0	0
Espagne	98	93	87	78	57	25	99	93	87	76	67	38
Estonie	86	72	65	55	35	0	88	72	65	53	42	20
États Unis d'Amérique	99	97	93	83	62	30	99	97	93	81	71	44

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$	(7) $\geq b_p$	(8) $\geq b_{fq}$	(9) $\geq b_m$	(10) $\geq b_{fm}$	(11) $\geq b_{mw}$	(12) $\geq b_e$
Éthiopie	6	5	4	4	0	0	6	5	4	4	2	0
Falkland (Îles) UK	8	2	0	0	0	0	9	2	0	0	0	0
Féroé	75	69	58	0	0	0	76	69	58	0	0	0
Fidji (Îles)	18	14	1	0	0	0	19	14	1	0	0	0
Finlande	98	94	88	80	65	24	98	94	88	78	72	44
France	100	95	84	67	41	12	100	95	84	64	51	22
Gabon	39	37	34	31	1	0	39	37	34	22	1	0
Gambie	28	26	23	0	0	0	28	26	23	0	0	0
Gaza	100	100	100	95	0	0	100	100	100	79	36	0
Géorgie	81	76	50	14	0	0	81	76	50	10	0	0
Ghana	29	23	18	12	4	0	30	23	18	11	7	0
Gibraltar UK	100	100	100	100	0	0	100	100	100	100	84	0
Grèce	90	80	70	54	41	17	91	80	70	52	44	31
Grenade	47	43	14	0	0	0	47	42	14	0	0	0
Guadeloupe	95	95	88	38	1	0	95	95	88	32	17	0
Guatemala	53	39	30	22	17	0	55	38	30	22	20	3
Guernesey UK	100	100	99	14	0	0	100	100	99	0	0	0
Guinée	10	9	7	0	0	0	10	9	7	0	0	0
Guinée-Bissau	21	18	5	0	0	0	21	18	5	0	0	0
Guinée Équatoriale	18	15	15	14	5	0	18	15	15	14	13	1
Guyane	39	36	32	8	0	0	39	36	32	0	0	0
Guyane Française	37	37	24	0	0	0	37	37	24	0	0	0
Haïti	24	22	20	16	0	0	25	22	20	14	0	0
Honduras	49	41	35	27	12	0	50	41	35	27	22	0
Hongrie	100	95	76	41	19	5	100	94	76	37	23	12
Îles Caïmans UK	92	90	78	55	0	0	92	86	78	50	16	0
Îles Vierges Brit.	70	63	52	0	0	0	70	63	52	0	0	0
Inde	61	41	25	12	4	0	63	40	25	10	6	1
Indonésie	42	33	24	12	4	0	42	33	24	11	6	0
Irak	86	77	68	44	24	5	87	77	68	40	28	16
Iran	88	81	73	57	35	14	89	81	73	54	42	21
Irlande	86	65	52	37	19	0	88	65	52	34	27	0
Israël	100	100	99	97	79	26	100	100	99	95	90	52
Italie	100	99	95	78	35	6	100	99	95	72	50	15
Jamaïque	98	87	67	44	26	0	99	85	67	43	33	5
Japon	100	99	96	86	63	27	100	99	96	84	73	41
Jersey UK	100	100	96	0	0	0	100	100	96	0	0	0
Jordanie	94	91	88	70	35	8	94	91	88	65	57	23
Kazakhstan	58	54	47	31	3	0	58	54	47	26	9	0
Kenya	19	16	12	7	0	0	19	16	12	6	1	0
Kirghizistan	75	66	47	17	0	0	75	66	47	12	6	0
Koweït	100	100	100	99	98	86	100	100	100	99	98	96
Laos	16	14	11	2	0	0	16	14	11	0	0	0
Lesotho	17	11	9	0	0	0	17	11	9	0	0	0
Lettonie	77	68	61	47	33	0	78	68	61	44	37	11
Liban	100	97	81	43	2	0	100	96	81	37	14	0
Liberia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Libye	83	78	73	62	39	8	84	78	73	58	48	21
Liechtenstein	100	100	100	0	0	0	100	100	100	0	0	0
Lituanie	86	71	61	42	12	0	89	71	61	38	23	0
Luxembourg	100	100	100	94	63	0	100	100	100	90	81	11
Macao	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100	100	0
Macédoine	92	82	71	32	0	0	94	81	71	29	12	0
Madagascar	11	10	8	0	0	0	11	10	8	0	0	0
Malaisie	78	68	58	40	20	1	78	68	58	36	25	8
Malawi	15	13	10	0	0	0	15	13	10	0	0	0
Mali	15	13	9	6	0	0	15	13	9	5	0	0
Malte	100	100	100	91	48	0	100	100	100	88	77	0
Man (Île de) UK	100	86	54	0	0	0	100	85	54	0	0	0
Maroc	62	53	45	35	16	4	63	52	45	32	25	7
Martinique F	100	99	93	61	0	0	100	99	93	58	39	0
Mauritanie	23	22	21	17	0	0	23	22	21	17	0	0

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$	(7) $\geq b_p$	(8) $\geq b_{fq}$	(9) $\geq b_m$	(10) $\geq b_{fm}$	(11) $\geq b_{mw}$	(12) $\geq b_c$
Mayotte F	6	5	0	0	0	0	7	3	0	0	0	0
Mexique	88	81	72	59	44	25	89	80	72	57	50	33
Moldavie	93	83	62	33	0	0	95	83	62	27	9	0
Monaco	100	100	100	100	87	0	100	100	100	100	100	0
Mongolie	34	33	31	16	0	0	34	33	31	11	0	0
Monténégro	83	74	58	9	0	0	84	74	58	0	0	0
Montserrat UK	56	25	0	0	0	0	59	25	0	0	0	0
Mozambique	10	9	7	4	0	0	10	9	7	3	1	0
Myanmar	25	19	12	8	2	0	25	19	12	7	5	0
Namibie	17	16	13	8	3	0	17	16	13	8	6	0
Népal	25	19	9	3	0	0	26	18	9	2	0	0
Nicaragua	56	48	42	22	11	0	57	48	42	22	20	0
Niger	3	2	1	1	0	0	3	2	1	1	0	0
Nigéria	45	37	27	17	7	1	46	36	27	15	12	2
Norfolk (Îles) AU	7	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
Norvège	95	89	82	72	52	20	96	89	82	70	61	30
Nouvelle Calédonie	45	44	44	42	0	0	45	44	44	41	0	0
Nouvelle Zélande	87	84	81	67	25	0	87	84	81	61	45	2
Oman	90	83	73	39	24	0	90	82	73	35	27	12
Ouganda	10	8	5	4	0	0	10	8	5	4	1	0
Ouzbékistan	90	84	68	28	10	0	90	83	68	24	12	1
Pakistan	87	77	54	26	14	4	88	76	54	24	18	8
Panamá	65	57	49	38	23	0	65	57	49	36	29	0
Papouasie Nouvelle Guinée	13	12	10	3	0	0	13	12	10	2	0	0
Paraguay	60	55	50	41	31	0	61	55	50	38	36	16
Pays-Bas	100	100	100	88	39	2	100	100	100	85	60	16
Pérou	58	56	52	44	30	15	59	56	52	41	33	23
Philippines	50	42	34	23	14	2	50	42	34	22	17	8
Pologne	99	88	72	44	18	0	100	87	72	39	26	3
Porto Rico	100	100	100	93	46	23	100	100	100	90	67	33
Portugal	98	90	80	60	33	14	99	89	80	57	42	22
Qatar	100	100	99	97	92	81	100	100	99	96	94	84
Roumanie	84	69	52	23	7	0	86	69	52	19	13	0
Royaume Uni	100	98	94	79	40	4	100	98	94	74	55	15
Russie	87	80	73	60	34	8	88	79	73	57	44	15
Rwanda	6	4	4	0	0	0	6	4	4	0	0	0
Sahara Occidental	11	9	8	2	0	0	12	9	8	2	0	0
Sainte-Lucie	88	84	69	0	0	0	89	84	69	0	0	0
Saint-Marin	100	100	100	99	0	0	100	100	100	90	0	0
Sénégal	35	32	26	18	0	0	35	31	26	18	2	0
Serbie	95	83	63	22	5	0	96	82	63	19	12	0
Seychelles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sierra Leone	15	15	14	0	0	0	15	15	14	0	0	0
Singapour	100	100	100	100	100	60	100	100	100	100	100	95
Slovaquie	100	100	92	35	7	0	100	100	92	29	14	0
Slovénie	100	98	81	47	19	0	100	97	81	43	30	0
Somalie	11	9	0	0	0	0	11	9	0	0	0	0
Soudan	23	21	18	13	8	0	23	20	18	13	10	0
Sri Lanka	44	26	12	0	0	0	46	24	12	0	0	0
St Christophe et Niévès	97	84	65	0	0	0	99	81	65	0	0	0
St.Vinc. - Grenadines	77	62	21	0	0	0	78	62	21	0	0	0
Suède	99	97	93	79	51	18	99	97	93	75	62	31
Suisse	100	100	97	67	15	0	100	100	97	57	28	0
Surinam	66	59	53	30	0	0	66	59	53	18	0	0
Swaziland	22	14	10	0	0	0	23	14	10	0	0	0
Syrie	89	79	65	42	13	0	89	78	65	39	23	0
Tadjikistan	73	61	41	8	0	0	74	60	41	3	0	0
Taïwan	100	99	99	92	60	16	100	99	99	87	72	34
Tanzanie	14	12	11	6	0	0	14	12	11	6	5	0
Tchad	7	5	5	0	0	0	7	5	5	0	0	0
Tchèque (République)	100	100	95	59	22	0	100	100	95	52	34	5
Thaïlande	68	56	45	25	14	8	69	56	45	22	17	11

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$	(7) $\geq b_p$	(8) $\geq b_{fq}$	(9) $\geq b_m$	(10) $\geq b_{fm}$	(11) $\geq b_{mw}$	(12) $\geq b_e$
Togo	19	17	15	2	0	0	19	17	15	0	0	0
Trinité-et-Tobago	99	96	90	67	2	0	99	96	90	59	29	0
Tunisie	80	70	60	38	11	0	82	69	60	33	22	2
Turkménistan	56	50	38	19	4	0	57	49	38	16	11	0
Turks et Caïques (Îles) UK	54	52	0	0	0	0	54	52	0	0	0	0
Turquie	79	71	62	40	15	0	80	70	62	36	25	2
Ukraine	93	85	70	40	7	0	93	85	70	34	18	0
Uruguay	80	75	73	62	50	18	80	75	73	61	54	37
Vanuatu	8	6	4	4	0	0	8	5	4	4	2	0
Venezuela	90	85	80	71	52	23	91	84	80	70	62	31
Vierges (Îles) Amér.	100	100	99	94	0	0	100	100	99	84	39	0
Viêt Nam	31	22	14	9	4	0	32	22	14	8	5	2
Yémen	41	34	23	13	3	0	42	33	23	12	7	0
Zaire	13	12	11	7	0	0	13	12	11	7	1	0
Zambie	38	36	32	12	0	0	38	36	32	11	4	0
Zimbabwe	30	28	25	17	0	0	30	28	25	14	1	0
Union Européenne	99	97	90	72	38	8	99	96	90	68	51	17
Le Monde	62	53	43	30	16	6	63	52	43	28	21	9

TAB. 6 – Valeurs numériques et références des seuils du Tableau 1, colonnes 7 à 12. La clarté naturelle du ciel a été soustraite.

b_p	b_{fq}	b_m	b_{fm}	b_{mw}	b_e
10% b_n	$\sim 90 \mu\text{cd}/\text{m}^2$	$252 \mu\text{cd}/\text{m}^2$	$\sim 890 \mu\text{cd}/\text{m}^2$	$6 b_n$	$4452 \mu\text{cd}/\text{m}^2$
Smith 1979	e.g. Walker 1987	basé sur Krisciunas & Schaefer 1991	e.g. Walker 1987	estimé	Garstang 1986

TAB. 8 – Pourcentage de la superficie du territoire où la clarté artificielle du ciel au niveau de la mer lors d'une nuit dégagée est supérieure aux niveaux donnés.

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$
Afghanistan	0,4	0,1	0	0	0	0
Afrique du Sud	13,7	6,8	3	1,2	0,3	0
Albanie	17,1	5,2	1,3	0,1	0	0
Algérie	9,4	4,4	1,8	0,7	0,2	0
Allemagne	100	94,5	64,5	16,9	1,9	0
Andorre	100	100	89,8	27,9	0	0
Angola	0,9	0,4	0,2	0	0	0
Anguilla UK	100	83,6	19	0	0	0
Antigua et Barbuda	63,5	49,8	21,6	1,3	0	0
Antilles Néerlandaises	89,3	66,1	43,2	26,8	5,4	0
Arabie Saoudite	19,3	9,8	4,5	1,7	0,4	0,1
Argentine	11,3	4,6	1,9	0,7	0,2	0
Arménie	17,8	7,2	2,1	0,5	0	0
Australie	2,3	1	0,4	0,2	0	0
Autriche	100	76,2	29,3	3,5	0,4	0
Azerbaïdjan	23,3	9,3	3,2	0,8	0	0
Bahamas	7,8	4,9	3,4	1,7	0,3	0
Bahreïn	100	100	91,6	74,6	50,7	25,8
Bangladesh	24,4	9	3	0,6	0,1	0
Barbade	100	93,3	64,6	20	0	0
Belgique	100	100	99,8	74,4	11,4	0,3
Belize	7,6	2,5	0,6	0	0	0
Bénin	1,6	0,6	0,2	0	0	0
Bermudes UK	100	100	92,5	17	0	0
Bhoutan	0,4	0,1	0	0	0	0
Biélorussie	41	14,8	4,9	0,8	0,1	0
Bolivie	3	1,4	0,6	0,2	0	0
Bosnie-Herzégovine	40,5	12,6	2,2	0	0	0
Botswana	0,6	0,2	0,1	0	0	0
Bésil	7,9	3,5	1,4	0,5	0,1	0
Brunei	47,6	27,2	15,8	8,4	1,1	0
Bulgarie	41,1	12	3,4	0,4	0	0
Burkina Faso	0,9	0,4	0,1	0	0	0
Burundi	1,6	0,6	0,2	0	0	0
Caïmans (Îles) UK	68,8	59,3	27,5	10,9	0	0
Cambodge	1,3	0,5	0,2	0	0	0
Cameroun	1,4	0,5	0,1	0	0	0
Canada	32,8	18,6	9,2	3,6	1	0,2
Centrafricaine (République)	0	0	0	0	0	0
Chili	12,2	5,6	2,1	0,7	0,2	0
Chine	12,5	6	2,4	0,5	0,1	0
Chypre	85,1	57,3	29,5	7,1	0,7	0
Cisjordanie	100	100	92,7	43,2	4,1	0
Colombie	14	5,9	2,3	0,7	0,1	0
Congo	1,2	0,5	0,2	0	0	0
Corée du Nord	8,8	3,6	1,1	0,1	0	0
Corée du Sud	99,7	98,2	79,2	32	5,9	1,2
Costa Rica	34,1	15,1	6	2,1	0,5	0
Côte d'Ivoire	2,5	0,9	0,3	0,1	0	0
Croatie	74,8	41,4	14,3	1,7	0,2	0
Cuba	14,6	5,8	2,1	0,5	0,1	0
Danemark	99,5	87,4	46	9,1	0,9	0
Djibouti	1,6	0,6	0,2	0	0	0
Dominicaine (République)	45	22,6	8,4	2,4	0,6	0
Dominique	8,1	2,5	0	0	0	0
Égypte	17,1	10,7	6,4	2,5	0,3	0,1
El Salvador	59,1	33,4	12,4	3,4	0,8	0
Émirats Arabes Unis	74,6	50,9	30,2	12,8	3,1	0,7
Équateur	17,4	8,2	3,3	0,7	0,1	0
Érithrée	0,8	0,3	0,1	0	0	0
Espagne	83,3	50,4	23	7,3	1,4	0,2
Estonie	59,7	23,8	9,3	2,4	0,5	0

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$
États Unis d'Amérique	61,8	42,7	22,5	9,2	2,6	0,6
Éthiopie	0,4	0,2	0,1	0	0	0
Falkland (Îles) UK	5,1	0	0	0	0	0
Féroé	33,8	13,5	2,3	0	0	0
Fidji (Îles)	3	1	0,1	0	0	0
Finlande	70	47,2	22,7	6,7	1,3	0,2
France	98,9	75,1	36	9,6	1,4	0,1
Gabon	3,3	1,5	0,8	0,3	0	0
Gambie	2,5	1,2	0,6	0	0	0
Gaza	100	100	100	74,5	0	0
Géorgie	10,6	4,5	1,2	0,1	0	0
Ghana	4,3	1,7	0,7	0,3	0	0
Gibraltar UK	100	100	100	100	0	0
Grèce	57,7	25,7	9,4	2,2	0,6	0,1
Grenade	24,5	13,5	3,3	0	0	0
Guadeloupe	89,5	87,5	55,6	10,3	0	0
Guatemala	16,1	5,8	2,1	0,7	0,2	0
Guernesey UK	100	100	97,7	3,8	0	0
Guinée	0,4	0,2	0,1	0	0	0
Guinée-Bissau	1,8	0,7	0,2	0	0	0
Guinée Équatoriale	5,5	3	1,3	0,5	0,1	0
Guyane	0,4	0,2	0,1	0	0	0
Guyane Française	0,6	0,3	0,1	0	0	0
Haïti	5,1	2,1	0,9	0,3	0	0
Honduras	10,6	4,5	1,8	0,5	0	0
Hongrie	100	81,9	29,9	3,4	0,6	0,1
Inde	34,7	14,9	5	0,8	0,1	0
Indonésie	6,8	3,3	1,4	0,3	0	0
Irak	25,3	11,5	5,1	2	0,5	0
Iran	30,2	14,2	6,2	2	0,5	0,1
Irlande	61,2	22	7	1,5	0,3	0
Israël	90,3	78	58,6	35,7	9,4	1
Italie	99,4	91,9	58,7	19,1	1,9	0,1
Jamaïque	93,7	57,4	22,4	5,2	1	0
Japon	98,5	84,4	53,5	24	5,6	1
Jersey UK	100	100	68,4	0	0	0
Jordanie	27,2	15,8	9	2,1	0,4	0
Kazakhstan	4,3	1,9	0,8	0,2	0	0
Kenya	1,6	0,7	0,3	0,1	0	0
Kirghizistan	12,4	5,3	1,5	0,1	0	0
Koweït	100	88,4	65	39,4	13,2	3,5
Laos	1,7	0,7	0,3	0	0	0
Lesotho	3,4	1,2	0,4	0	0	0
Lettonie	34,8	13	4	1,1	0,3	0
Liban	100	66	33,3	6,7	0,3	0
Liberia	0	0	0	0	0	0
Libye	8,4	4,1	1,7	0,6	0,1	0
Liechtenstein	100	100	90,6	0	0	0
Lithuanie	62,2	21,3	6,9	1,5	0,1	0
Luxembourg	100	100	100	61,2	11,6	0
Macao P	100	100	100	100	100	0
Macédoine	56,7	19,3	5,6	0,5	0	0
Madagascar	0,2	0,1	0	0	0	0
Malaisie	22,2	11,9	5,4	1,6	0,3	0
Malawi	3,4	1,7	0,7	0,2	0,1	0
Mali	0,4	0,2	0,1	0	0	0
Malte	100	100	99,4	73,7	14,4	0
Man (Île de) UK	100	65,9	19,1	0	0	0
Mariannes du Nord (Îles) US	0	0	0	0	0	0
Maroc	12,4	4,9	1,7	0,5	0,1	0
Martinique F	100	91,9	67	16,6	0	0
Mauritanie	0,2	0,1	0	0	0	0

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$
Mayotte F	7,9	3	0	0	0	0
Mexique	30,5	16,1	7,2	2,4	0,6	0,1
Moldavie	67,3	26,2	7,1	0,9	0,1	0
Monaco	100	100	100	100	63,2	0
Mongolie	0,3	0,1	0	0	0	0
Monténégro	31,3	10,9	2,9	0,1	0	0
Montserrat UK	56,1	15,8	0	0	0	0
Mozambique	0,5	0,2	0,1	0	0	0
Myanmar	2,9	1,1	0,3	0,1	0	0
Namibie	0,7	0,3	0,1	0	0	0
Népal	3,1	1,2	0,3	0	0	0
Nicaragua	8,2	3,3	1,2	0,3	0	0
Niger	0,2	0,1	0	0	0	0
Nigeria	12,4	7,8	5,3	3	1,1	0,1
Norfolk (Îles) AU	2,9	0	0	0	0	0
Norvège	62,8	34,6	14,6	4,4	0,9	0,1
Nouvelle Calédonie	3,2	1,3	0,6	0,3	0	0
Nouvelle Zélande	11,7	5	2,1	0,7	0,1	0
Oman	27,8	12,7	4,8	1,4	0,3	0
Ouganda	1,1	0,5	0,2	0	0	0
Ouzbékistan	23,4	13,8	6,5	1	0,1	0
Pakistan	30,2	19,4	7,9	0,9	0,2	0
Panama	11,7	5,4	2,3	0,7	0,1	0
Papouasie-Nouvelle-Guinée	2,1	1	0,5	0,2	0	0
Paraguay	4,6	2	0,9	0,4	0,1	0
Pays Bas	100	99,1	96,7	56,8	8,3	0,6
Pérou	3	1,3	0,5	0,2	0,1	0
Philippines	12,6	6,2	2,5	0,7	0,2	0
Pologne	96,8	59,6	23,9	4,3	0,5	0
Porto Rico	99,4	98,9	97,2	68,4	11,5	2,2
Portugal	85,1	47,8	24,1	6,8	1,1	0,2
Qatar	99,3	89,5	55,2	27,5	8,8	2,6
Roumanie	52,2	20,5	5,9	0,6	0	0
Royaume Uni	84,7	67,9	48,1	20,1	3,5	0,1
Russie	24,2	11,1	4,3	1,2	0,2	0
Rwanda	2	0,8	0,3	0	0	0
Sahara Occidental	0,7	0,3	0,1	0	0	0
Saint Christophe et Niévès	92,3	53	22,1	0	0	0
Sainte-Lucie	60,3	29,7	10,9	0	0	0
Saint-Marin	100	100	100	97,2	0	0
Sénégal	1,3	0,5	0,2	0,1	0	0
Serbie	72	37,3	11,8	1,1	0,1	0
Seychelles	0	0	0	0	0	0
Sierra Leone	0,6	0,2	0,1	0	0	0
Singapour	100	100	100	100	100	33,3
Slovaquie	100	98,4	64,1	4,8	0,2	0
Slovénie	100	84,2	29,3	3,1	0,2	0
Somalie	0	0	0	0	0	0
Soudan	0,8	0,4	0,1	0	0	0
Sri Lanka	21,6	8,8	2,4	0	0	0
St.Vincent-Grenadines	29,7	13,8	2,4	0	0	0
Suède	66,9	49,9	26,6	6,7	1,2	0,1
Suisse	100	97,7	57,4	10,2	0,4	0
Surinam	1	0,4	0,2	0	0	0
Swaziland	11	4,1	1,2	0	0	0
Syrie	50,3	26,6	11,2	3,9	1	0,1
Tadjikistan	13,1	5,5	1,7	0	0	0
Taiwan	90,5	63,1	45,5	27,2	6,4	0,4
Tanzanie	1,5	0,7	0,3	0,1	0	0
Tchad	0,1	0	0	0	0	0
Tchèque (République)	100	99,7	76	11,8	0,9	0
Thaïlande	33,6	18,1	9	2,7	0,5	0,1

Pays	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$
Togo	1,3	0,6	0,3	0	0	0
Trinité-et-Tobago	89,8	53,7	29,6	10,7	0,1	0
Tunisie	28	12,6	4,8	1,2	0,1	0
Turkménistan	9,2	4,1	1,6	0,4	0,1	0
Turks and Caiques Is. UK	15,6	8,7	0	0	0	0
Turquie	31,2	12,2	4,1	0,7	0,1	0
Ukraine	62,4	31,2	11,1	1,7	0,1	0
Uruguay	14,4	5,6	2,3	0,9	0,3	0
Vanuatu	5,7	4,8	2,7	1,1	0	0
Venezuela	21,6	10,8	5,1	2	0,5	0
Vierges (Îles) Amér.	100	93,6	77,3	53,2	0	0
Vierges (Îles) Brit.	51	44,5	32,8	0	0	0
Vietnam	7	2,8	1	0,3	0	0
Yémen	6,1	2,5	0,8	0,2	0	0
Zaïre	0,4	0,1	0,1	0	0	0
Zambie	1,1	0,4	0,2	0	0	0
Zimbabwe	2,6	1,1	0,5	0,1	0	0
Union Européenne	85,3	64,8	36,7	11,5	1,7	0,1
Le Monde	18,7	10,9	5,3	1,8	0,4	0,1