

Modélisation de la radiance artificielle du ciel nocturne à Hawaï et élaboration d'un plan de restauration optimisé du ciel étoilé

Alexandre Simoneau
Département de Physique, Université de Sherbrooke

Dans le cadre du cours PHQ 662
Initiation à la recherche
sous la supervision de Martin Aubé
Département de Physique, Cégep de Sherbrooke

9 juin 2016

RÉSUMÉ

Le but de cette étude est d'évaluer le niveau actuel de pollution lumineuse du ciel nocturne de l'observatoire Haleakala sur l'île Maui dans l'état d'Hawaii. Cette évaluation sera accomplie à l'aide d'un modèle numérique déjà testé dans la première Réserve Internationale de Ciel Étoilé situé dans le parc national du Mont-Mégantic au Canada. Ce modèle utilise des données terrain sur les sources de lumières artificielle présentes dans la région d'étude, des données géographiques ainsi que des images satellites de la lumière artificielle émises vers le ciel de la région. Les résultats de ce modèle donnent une certaine mesure de la situation actuelle à l'observation d'Haleakala. Ainsi, en utilisant la situation actuelle comme référence, divers plan de conversion de la lumière sont élaboré et validé avec le modèle pour évaluer l'impact prévu sur le ciel nocturne. Une conversion vers de la lumière blanche DEL avec une CCT de 4000K est présentée côte à côte avec une autre conversion vers de la lumière ambrée. Nous incluons des suggestions concernant le type de lampadaires à utiliser dans les zones sensibles et la régulation possible de la couleur des lampes utilisées la nuit.

1. Introduction

L'évaluation de la radiance du ciel sous des conditions dégagées est une tâche complexe du fait des multiples variables en oeuvre dans le procédé. En effet, il a été montré que la radiance du ciel est une fonction complexe du contenu atmosphérique moléculaire et en aérosol ainsi que de la distribution géographique des lumières anthropogéniques au sol et leur relations avec les propriétés optiques et géographiques voisines telles que la réflectance intrinsèque du sol sous-jacent, la topographie

et la présence de petits et moyens obstacles (e.g. arbres et bâtiments)[1]. La plupart de ces facteurs varient en fonction du temps à différentes fréquences, que ce soit la composition de l'atmosphère, la présence de feuilles, la réflectance du sol, et parfois de manière aléatoire, comme l'éclairage ornemental. Cet étalement des valeurs des variables clés a été observé par plusieurs auteurs comme une dispersion dans les données recueillies sur le terrain [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Ces variations pratiquement imprévisibles rendent la caractérisation à long terme de la radiance du

ciel complexe puisqu'il faut également mesurer plusieurs paramètres tels la profondeur optique et le coefficient Ångström α (i.e. la concentration, composition chimique et distribution de taille) des aérosols présents. Une autre méthode permettant d'évaluer l'évolution de la radiance du ciel consiste à utiliser un modèle de transfert radiatif qui permet de sélectionner des valeurs variées des variables clés mentionnées ci-haut, ce qui leur permet de conserver une valeur fixe prédéfinie. Plusieurs modèles de radiance du ciel ont été développés depuis les années 80. Certains sont basés sur une description géographique homogène ou simpliste des variables clés tel le modèle de Garstang [12]. En effet, selon ce modèle, une ville est modélisée par un cercle parfait avec une intensité lumineuse au sol, une réflectance du sol et une distribution angulaire de la lumière émise par les sources uniformes. De plus, la topographie est plate et la diffusion lumineuse au second ordre n'est pas calculée explicitement. Certaines améliorations au modèle de Garstang ont été proposées [13, 14] pour réduire ces limitations mais souffre quand même de simplifications grossières (pas d'obstacle, pas de calcul explicite du second ordre de diffusion). Des modèles plus récents devraient rendre plus précisément la complexité de l'environnement et ainsi être plus réalistes en regard à des situations réelles [14, 15, 16, 1].

2. Méthodologie

2.1 Description du modèle

Le modèle de transfert radiatif utilisé est appelé Illumina [17]. Ce modèle est distribué sous licence publique GPL et est disponible au téléchargement depuis BitBucket¹. Illumina agit comme un traceur de rayons où un ensemble de photons sont lancés depuis des lampadaires situés au-dessus du niveau du sol et qui se rendent ensuite dans le champ de vision de l'observateur suivant quatre types de trajets optiques, illustrés à la figure 1 : (i) simple diffusion par les molécules et aérosols présents dans l'air sur un voxel de la ligne de visée (I_1), (ii)

simple diffusion dans l'air après une réflexion Lambertienne sur le sol (I_{r1}), (iii) une seconde diffusion dans un voxel sur la ligne de visée après une première dans un voxel atmosphérique dans un volume voisinant (I_2) et (iv) le même trajet que (iii) mais après une réflexion sur un pixel au niveau du sol.

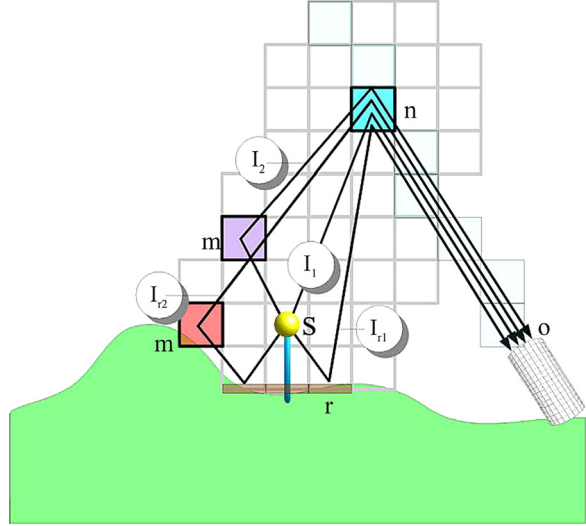


FIGURE 1 – Trajets optiques considérés dans le calcul de la radiance artificielle du ciel dans le modèle ILLUMINA. "o" représente l'observateur, "n" est un voxel donné qui est dans la ligne de visée, "s" est une cellule contenant une ou des sources de lumière, et "m" sont des voxels intervenant dans le calcul du second ordre de diffraction. [18]

Les processus de diffusions en direction de l'observateur et l'absorption causée par les aérosols et les molécules d'air sont calculés pour tous les trajets lumineux considérés. Illumina calcule à la fois le premier et le second ordre de diffusion de la lumière. Le second ordre peut avoir un impact non-négligeable sur la radiance du ciel, en particulier lorsque l'observateur est loin des sources principales de lumières, i.e. les villes [2]. En effet, la propagation de la lumière artificielle est très différente de celle d'une source ponctuelle, tel le soleil, puisque les sources sont réparties sur une grande surface comparée à la distance à l'observateur. L'importance du second ordre de diffusion dans ce cas peut être compris via le fait que la pre-

1. <https://bitbucket.org/aubema/illumina>

mière diffusion agit comme une source étendue pour la seconde, ce qui fait que l'intensité décroît moins rapidement avec la distance à l'observateur que pour une source ponctuelle. En plus du traitement explicite de la seconde diffusion, Illumina présente également l'avantage d'être basé sur un concept en maillage, ce qui permet de faire varier plusieurs variables clés dont le flux total de lumière émis, le spectre de cette lumière, la distribution angulaire, la hauteur des sources et des obstacles, la réflectance du sol et la topographie indépendamment pour chaque pixel. Cela permet de faire des simulation beaucoup plus complexes et proches de la réalité telle qu'elle apparaît dans une ville et son environnement.

Généralement, l'ensemble des données maillées proviennent de senseurs embarqués sur des satellites (MODIS, VIIRS, SRTM), mais il y a certaines exceptions comme les paramètres atmosphériques, la distance moyenne aux obstacles et autres qui sont actuellement fixés de manière uniforme pour tout le modèle. Des modèles standard d'aérosols sont utilisés pour calculer les paramètres de diffusions des photons.

Bien que plusieurs des paramètres clés du modèle dépendent intrinsèquement de la longueur d'onde (diffusion, réflectance, émission des sources lumineuse), Illumina n'était pas tout à fait en mesure de traiter des modèles multispectraux. Ceci était une lacune importante du modèle et de tout ces prédécesseurs puisque la radiance artificielle dépend fortement de la couleur de la lumière considérée. De plus, avec l'arrivée des lampadaires au DEL, plusieurs municipalité convertissent leurs lampes au sodium pour des DEL qui ont une lumière nettement plus blanche. Or, on sait que à luminosité visible égale, la lumière bleu a un impact beaucoup plus grand sur le ciel étoilé ainsi que sur la santé humaine que la lumière rouge [19]. De pouvoir caractériser précisément comment un changement dans le spectre des lampadaires sur un territoire va affecter la radiance artificielle est un atout majeur. De plus, du fait que les capteurs VIIRS et autres sont sensibles à l'infrarouge mais non au bleu [20],

il faut faire attention d'une interprétation trop rapide de données brutes telles la figure 2.

2.2 Améliorations apportées

Le modèle Illumina a été modifié de manière à accepter des modèles multispectraux. Ceci introduit quelques changement dans la préparation des intrants et dans le traitement.

La carte de flux radiatif est créée à partir des données VIIRS, de la réflectance MODIS et de la photométrie angulaire et la distribution spectrale de la puissance des sources, qui sont tous définis pour chaque pixel (1km^2) du territoire étudié, ici l'archipel d'Hawaii. Il faut également prendre en compte la sensibilité spectrale du capteur VIIRS. Définissons la distribution angulaire de la radiation lumineuse $G(z, \phi, \lambda)$ exprimée en unités de $[\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}]$. Le produit de $G(z, \phi, \lambda)$ et du flux radiatif Φ_e [W] défini l'intensité spectrale I_e [W/sr/nm] à tout angle

$$I_e(z, \phi, \lambda) = G(z, \phi, \lambda)\Phi_e \quad (1)$$

avec z l'angle zénithal et ϕ l'angle azimutal. À nos fins de modélisation, où plusieurs lampes d'orientation azimutale variable tombent dans le même pixel, nous pouvons enlever la dépendance azimutale en moyennant la fonction de photométrie angulaire horizontalement pour obtenir le patron d'émission de lumière (LOP²) d'un pixel $\bar{G}(z)$ défini comme

$$\bar{G}(z, \lambda) = \int_{\phi=0}^{360} \frac{G(z, \phi, \lambda)}{2\pi} d\phi \quad (2)$$

De sorte que l'équation (1) peut être réécrite comme

$$I_e(z, \lambda) = \bar{G}(z, \lambda)\Phi_e \quad (3)$$

où $\bar{G}(z, \lambda)$ devrait être normalisé pour tout angle solide et longueur d'onde.

$$2\pi \int_{\lambda} \int_{z=0}^{180} \bar{G}(z, \lambda) \sin(z) dz d\lambda = 1 \quad (4)$$

Dans le cas des données utilisés, pour un pixel n donné, $\bar{G}(z, \lambda)$ peut être exprimé comme le produit de deux fonction normalisées $LOP_n(z)$ and $J_n(\lambda)$ représentant respectivement la photométrie angulaire du pixel et

2. Light Output Pattern

son sa distribution spectrale de la puissance émise.

Le signal mesuré par le capteur VIIRS est donné par :

$$DNB \approx \Phi_e \int_{\lambda} R \left(\frac{1}{\pi} \rho F_{90}^{180} + \langle \bar{G} \rangle_0^{56} \right) d\lambda \quad (5)$$

où les dépendance en λ de $R(\lambda)$, $\rho(\lambda)$, $F_{90}^{180}(\lambda)$ et $\langle \bar{G} \rangle_0^{56}(\lambda)$ ont été omises par souci de concision et où $R(\lambda)$ est la sensibilité spectrale normalisé du capteur VIIRS de sorte que

$$\int_{\lambda} R(\lambda) d\lambda = 1 \quad (6)$$

Φ_e est la flux radiatif des lampes contenues dans le pixel, $F_{90}^{180}(\lambda)$ et $\langle \bar{G} \rangle_0^{56}(\lambda)$ sont respectivement la quantité de lumière dirigée vers le sol par unité de longueur d'onde et la valeur moyenne de $\bar{G}(z, \lambda)$ sur les angles possible de vue du satellite. Il est important de comprendre ici que les images VIIRS-DNB sont des composites mensuels ce qui implique une moyenne de plusieurs données prises à différents angles qui peuvent varier entre 0° et 56° au cours du mois.

$$F_{90}^{180}(\lambda) = \int_{z=90}^{180} 2\pi \sin(z) \bar{G}(z, \lambda) dz \quad (7)$$

$$\langle \bar{G} \rangle_0^{56}(\lambda) = \frac{\int_{z=0}^{56} \sin(z) \bar{G}(z, \lambda) dz}{\int_{z=0}^{56} \sin(z) dz} \quad (8)$$

La distribution de lumière radiante $\bar{G}(z, \lambda)$ [W/sr/nm] pour un pixel donné peut être obtenue en exécutant une combinaison linéaire du produit du spectre et de la photométrie des lampes présente sur le territoire couvert par ce pixel.

$$\bar{G}(z, \lambda) = \frac{\sum_i L_i(\lambda, z)}{2\pi \int_{\lambda} \int_0^{180} \sum_i L_i(\lambda, z) \sin(z) dz d\lambda} \quad (9)$$

$$L_i(\lambda, z) \equiv A_i \bar{J}_i(\lambda) LOP_i(z) \quad (10)$$

où A_i est la fraction du nombre total de lampes dans le pixel qui ont le spectre $\bar{J}_i(\lambda)$ et la photométrie $LOP_i(z)$ qui doit être normalisé avec l'équation (11).

$$2\pi \int_{z=0}^{180} LOP_i(z) \sin(z) dz = 1 \quad (11)$$

Par définition, $\sum_i A_i = 1$. $\bar{J}_i(\lambda)$ est la distribution spectrale de puissance de la lampe i dans le pixel n normalisé à un lumen [W/sr/nm/lm]. L'équation (12) est utilisée pour normaliser la distribution spectrale de puissance.

$$\bar{J}_i(\lambda) = \frac{J_i(\lambda)}{683.002 \int_{\lambda} V(\lambda) J_i(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

où $J_i(\lambda)$ est la distribution spectrale de puissance non-normalisée de la lampe i et $V(\lambda)$ la fonction photopique standard de la Commission internationale de l'éclairage (CIE).

Le flux radiatif Φ_e [lm] est obtenu pour chaque pixel avec l'équation (13) qui est simplement l'équation (5) inversée.

$$\Phi_e = \frac{DNB}{\int_{\lambda} R(\lambda) \left(\frac{1}{\pi} \rho(\lambda) F_{90}^{180}(\lambda) + \langle \bar{G} \rangle_0^{56}(\lambda) \right) d\lambda} \quad (13)$$

2.3 Intrants spécifiques

Dans notre cas, nous avons modélisé le territoire de l'archipel d'Hawaii pour un observateur situé à Haleakala (20.708120° N, 156.257367° W), avec une atmosphère paramétrée par un taux d'humidité de 70%, un type d'aérosols maritimes, une épaisseur optique de 0.7 et un coefficient d'Angström $\alpha = 0.11$ à 500 nm [21]. Les données de caractérisations des sources de lumières au sol ont été obtenues de Richard Wainscoat et celles-ci ont été assumées homogènes dans des zones circulaires qu'il a défini. Un échantillonnage a été fait sur Google Street View pour caractériser la hauteur des lampadaires, la hauteur des obstacles ainsi que le libre parcours moyen de la lumière entre les obstacles. Ces paramètres ont été estimés respectivement à 7 mètres, 7 mètres et 25 mètres en moyenne. Ces valeurs sont légèrement arbitraires et devrait en général varier pour tout le territoire, mais puisque les sources importantes de lumières sont dans les villes, l'erreur effectuée est minimale sur les résultats finaux.

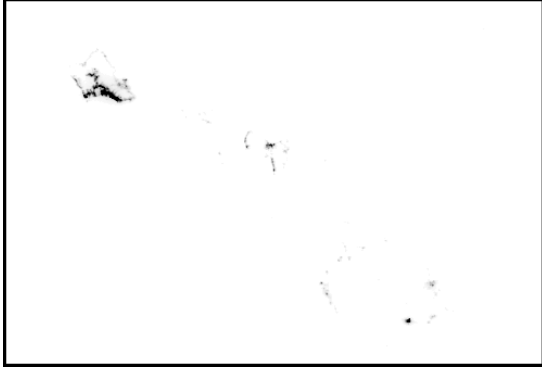


FIGURE 2 – Image VIIRS négative qui montre les sources de lumière artificielle sur l’archipel



FIGURE 3 – Résultat du modèle pour $\lambda = 814 \text{ nm}$, $z_o = 45^\circ$ l’angle zénithal d’observation et $\phi_o = 292^\circ$ l’angle azimutal d’observation

3. Résultats et analyse

Le modèle génère un ensemble de cartes de contribution à la pollution lumineuse semblables à celle présentée à la figure 3 pour tous paramètres qui est varié sur un ensemble d’exécutions. Dans notre cas, les seuls paramètres variables étaient la direction d’observation et la longueur d’onde étudiée. Une analyse rapide de la carte de luminosité pourrait laisser penser que puisque Honolulu est de loin la source de lumière la plus importante elle a un impact important sur la radiance du ciel au point d’observation. Or, une analyse détaillée révèle que sa contribution est faible devant les quelques sources de lumière sur l’île de Maui sur laquelle se situe l’observatoire. La figure montre le cas où celle-ci est la plus importante, soit lorsque l’on regarde dans la direction d’Honolulu à une longueur d’onde très présente sur cette île et la contribution reste faible. Cela nous signale donc que les endroits où il est important de limiter l’illumination néfaste sont situés sur la même île que l’observatoire. C’est une bonne nouvelle puisque cela signifie qu’il suffit de faire des efforts très localement pour réduire de manière importante la radiance artificielle du ciel nocturne vue depuis l’observatoire Haleakala.

Il est également intéressant de valider les modifications apportées au modèle. On remarque que les résultats obtenus ne présentent pas d’anomalies flagrantes ce qui semble confirmer le bon fonctionnement du modèle multis-

pectral, bien qu’une validation complète demanderait plus de travail.

4. Conclusions

Le modèle radiatif Illumina a été modifié pour effectuer des simulations multispectrales de la radiance artificielle du ciel nocturne. Ces modifications ont été validées avec une simulation du territoire de l’archipel d’Hawaï pour un observateur situé à l’observatoire Haleakala.

Il a été remarqué que la radiance artificielle au point d’observation est principalement produite par les villes situées sur la même île que l’observatoire et que la contribution d’Honolulu, bien que la quantité de lumière émise soit beaucoup plus importante, est faible en comparaison. Des mesures préventives de préservation du ciel étoilé devraient donc se concentrer principalement sur ces sources à proximité.

Références

- [1] M. Aubé, “Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, vol. 370, no. 1667, 2014.
- [2] M. Aubé, “Light pollution modeling and detection in a heterogeneous environment,” in *Proceedings of Starlight 2007 conference, La Palma, Spain, 2007*.

- [3] F. Patat, “The dancing sky : 6 years of night-sky observations at cerro paranal,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 481, no. 2, pp. 575–591, 2008.
- [4] F. Falchi, “Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable ccd camera,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 412, no. 1, pp. 33–48, 2011.
- [5] C. S. J. Pun and C. W. So, “Night-sky brightness monitoring in hong kong,” *Environmental monitoring and assessment*, vol. 184, no. 4, pp. 2537–2557, 2012.
- [6] C. S. J. Pun, C. W. So, W. Y. Leung, and C. F. Wong, “Contributions of artificial lighting sources on light pollution in hong kong measured through a night sky brightness monitoring network,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 139, pp. 90–108, 2014.
- [7] J. Puschnig, T. Posch, and S. Uttenthaler, “Night sky photometry and spectroscopy performed at the vienna university observatory,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 139, pp. 64–75, 2014.
- [8] M. Aubé, N. Fortin, S. Turcotte, B. García, A. Mancilla, and J. Maya, “Evaluation of the Sky Brightness at Two Argentinian Astronomical Sites,” *Publication of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 126, no. 945, pp. 1068–1077, 2014.
- [9] C. C. Kyba, K. P. Tong, J. Bennie, I. Birriel, J. J. Birriel, A. Cool, A. Danielsen, T. W. Davies, N. Peter, W. Edwards, *et al.*, “Worldwide variations in artificial skyglow,” *Scientific reports*, vol. 5, 2015.
- [10] A. Sánchez de Miguel, *Variación espacial, temporal y espectral de la contaminación lumínica y sus fuentes : Metodología y resultados*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2015.
- [11] A. Sánchez de Miguel, M. Aubé, J. Zamorano, M. Kocifaj, J. Roby, and C. Tapia, “Sky Quality Meter measurements in a color changing world,” *In preparation*, vol. 0, p. 0, Jan. 2014.
- [12] R. Garstang, “Model for artificial night-sky illumination,” *Publication of the Astronomical Society of the Pacific*, pp. 364–375, 1986.
- [13] C. B. Luginbuhl, D. M. Duriscoe, C. W. Moore, A. Richman, G. W. Lockwood, and D. R. Davis, “From the ground up ii : Sky glow and near-ground artificial light propagation in flagstaff, arizona,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 121, no. 876, pp. pp. 204–212, 2009.
- [14] P. Cinzano and F. Falchi, “The propagation of light pollution in the atmosphere,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 427, no. 4, pp. 3337–3357, 2012.
- [15] M. Kocifaj, “Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources,” *Appl. Opt.*, vol. 46, pp. 3013–3022, May 2007.
- [16] C. Baddiley, “A model to show the differences in skyglow from types of luminaire designs, with a view to recovering rural dark skies,” in *British astronomical Association - Campaign for Dark Skies*, 2007.
- [17] M. Aubé, L. Franchomme-Fosse, P. Robert-Staehler, and V. Houle, “Light pollution modelling and detection in a heterogeneous environment : toward a night-time aerosol optical depth retrieval method,” *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 5890, pp. 589012–589012–9, 2005.
- [18] M. Aubé and J. Roby, “Sky brightness levels before and after the creation of the first International Dark Sky Reserve, Mont-Mégantic Observatory, Québec, Canada,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 139, pp. 52–63, May 2014.
- [19] M. Aubé, J. Roby, and M. Kocifaj, “Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility,” *PLoS ONE*, vol. 8, p. e67798, 07 2013.
- [20] M. Fukugita, K. Shimasaku, and T. Ichikawa, “Galaxy colors in various photometric band systems,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 107, no. 716, pp. 945–958, 1995.
- [21] B. N. Holben, D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenue, Y. J. Kaufman, J. V. Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O’Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, and G. Zibordi, “An emerging ground-based aerosol climatology : Aerosol optical depth from aeronet,” *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 106, no. D11, pp. 12067–12097, 2001.