

Conservation du ciel nocturne : surveillance de l'éclairage extérieur et de la pollution lumineuse au parc national et à la Réserve internationale de ciel étoilé du Mont-Mégantic

Rémi Boucher, Sarah Knefati et Camille-Antoine Ouimet

Volume 142, numéro 3, automne 2018

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1051001ar>
DOI : <https://doi.org/10.7202/1051001ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

La Société Provoquant d'histoire naturelle du Canada

ISSN

0028-0798 (imprimé)
1929-3208 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Boucher, R., Knefati, S. & Ouimet, C.-A. (2018). Conservation du ciel nocturne : surveillance de l'éclairage extérieur et de la pollution lumineuse au parc national et à la Réserve internationale de ciel étoilé du Mont-Mégantic. *Le Naturaliste canadien*, 142(3), 88–94. <https://doi.org/10.7202/1051001ar>

Résumé de l'article

Pourtant d'apparence immuable, le ciel étoilé est aujourd'hui menacé de disparition. La cause est la croissance généralisée de la pollution lumineuse, résultat de l'utilisation de dispositifs d'éclairage inadéquats. Nous présentons ici les résultats de la mesure de cette pollution obtenue par différentes approches méthodologiques sur le territoire de la Réserve internationale de ciel étoilé du Mont-Mégantic (RICEMM). La RICEMM a été créée en 2007 afin de protéger la qualité des observations astronomiques et de recherche de l'observatoire du mont Mégantic, ainsi que pour conserver les paysages étoilés exceptionnels du site. Deux aspects incontournables de la lumière artificielle nocturne ont été pris en compte : ses sources, ainsi que sa diffusion dans l'atmosphère. Les analyses démontrent que le niveau de pollution lumineuse est resté stable depuis 10 ans dans la RICEMM, tant au zénith que pour l'ensemble du ciel, et ce, malgré une tendance mondiale à la hausse des niveaux d'éclairage, l'augmentation de la population dans la périphérie du parc national du Mont-Mégantic et l'arrivée sur le marché de types de luminaires problématiques.

Conservation du ciel nocturne : surveillance de l'éclairage extérieur et de la pollution lumineuse au parc national et à la Réserve internationale de ciel étoilé du Mont-Mégantic

Rémi Boucher, Sarah Knefati et Camille-Antoine Ouimet

Résumé

Pourtant d'apparence immuable, le ciel étoilé est aujourd'hui menacé de disparition. La cause est la croissance généralisée de la pollution lumineuse, résultat de l'utilisation de dispositifs d'éclairage inadéquats. Nous présentons ici les résultats de la mesure de cette pollution obtenue par différentes approches méthodologiques sur le territoire de la Réserve internationale de ciel étoilé du Mont-Mégantic (RICEMM). La RICEMM a été créée en 2007 afin de protéger la qualité des observations astronomiques et de recherche de l'observatoire du mont Mégantic, ainsi que pour conserver les paysages étoilés exceptionnels du site. Deux aspects incontournables de la lumière artificielle nocturne ont été pris en compte : ses sources, ainsi que sa diffusion dans l'atmosphère. Les analyses démontrent que le niveau de pollution lumineuse est resté stable depuis 10 ans dans la RICEMM, tant au zénith que pour l'ensemble du ciel, et ce, malgré une tendance mondiale à la hausse des niveaux d'éclairage, l'augmentation de la population dans la périphérie du parc national du Mont-Mégantic et l'arrivée sur le marché de types de luminaires problématiques.

MOTS CLÉS : ciel étoilé, dispositifs d'éclairage, mont Mégantic, paysages nocturnes, pollution lumineuse

Abstract

Although seemingly unchanging, today, our ability to see stars on a dark night is in danger of disappearing. The reason for this is the widespread growth of light pollution from inadequate lighting systems. This study, which used a range of methods, presents the results of light pollution measurements taken within the Mont-Mégantic International Dark Sky Reserve (MMIDSR), which was created in 2007 to protect the quality of astronomical observations and research at the Mont-Mégantic Observatory, and to preserve the exceptional starry nightscape visible from the site. Two essential elements of artificial night lighting were considered: its source and its diffusion in the atmosphere. Analyses showed that despite a global trend towards an increase in light levels, population growth on the outskirts of the Parc national du Mont-Mégantic, and the arrival of problematic types of lighting fixtures on the market, the level of light pollution in the MMIDSR has remained stable over the last 10 years, not only at the zenith but across the entire sky.

KEYWORDS: light pollution, lighting devices, Mont Mégantic, nightscape, starry night sky

Introduction

Jusqu'au 19^e siècle, l'éclairage nocturne n'était assuré que par la pleine lune, des torches et de modestes lanternes. L'avènement du gaz, puis celui de l'électricité, ont favorisé l'éclairage nocturne permanent d'où a émergé peu à peu la pollution lumineuse. La pollution lumineuse désigne toute modification de l'environnement lumineux nocturne naturel et toute nuisance provoquée par la lumière artificielle (International Dark-Sky Association, 2018a). Pourtant d'apparence immuable, le ciel étoilé est aujourd'hui menacé de disparition. Un grand nombre de personnes vivent au cœur des villes sans jamais avoir vu la beauté de la Voie lactée ou le scintillement de milliers d'étoiles sans lune. Il est estimé qu'actuellement 83 % de la population mondiale vit sous un ciel affecté par la pollution lumineuse (Falchi et collab., 2016). À Hong Kong, les niveaux d'éclairage dépassent de plus de 80 fois celui d'un ciel nocturne naturel (Chun et collab., 2014). L'arrivée sur le marché des diodes électroluminescentes (DELs)

constitue une préoccupation supplémentaire. Ces dernières peuvent dans certains cas (modèles dont la distribution spectrale induit une plus grande diffusion de la lumière dans le ciel nocturne) constituer une sérieuse menace à la protection du ciel étoilé (Jin et collab., 2015).

En plus du voilement des étoiles, les conséquences de la pollution lumineuse sont nombreuses : impacts sur la faune et la flore, perturbations des cycles circadiens et effets sur la santé, problèmes de sécurité, gaspillage de l'énergie, dévalorisation

Rémi Boucher est biologiste au parc national du Mont-Mégantic et à la Réserve internationale de ciel étoilé du Mont-Mégantic.

Sarah Knefati est détentrice d'une maîtrise en génie de l'environnement.

Camille-Antoine Ouimet (M. Env.) est responsable du service de la conservation du parc national du Mont-Mégantic.

ouimet.camilleantoine@sepaq.com

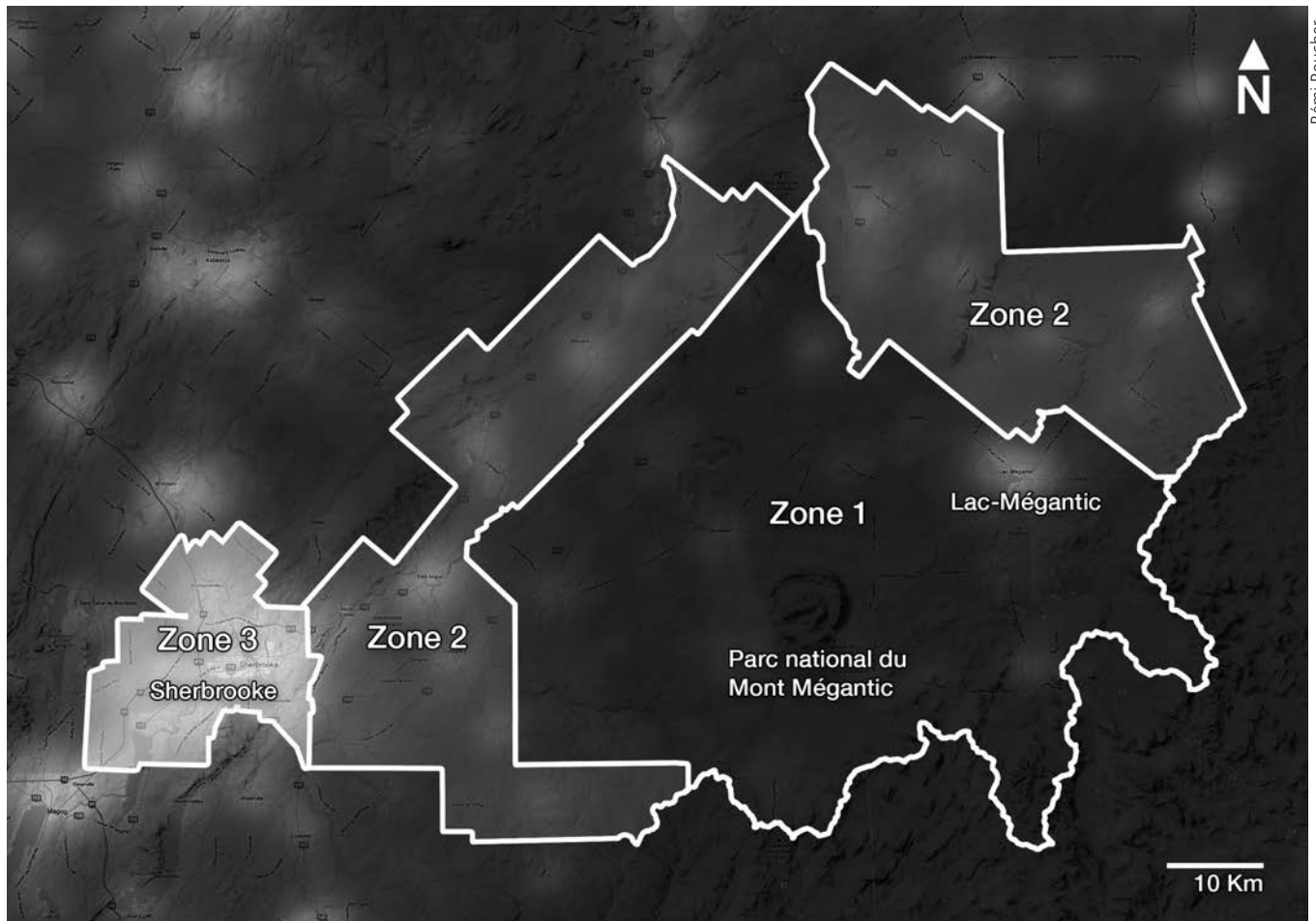


Figure 1 : Carte de la Réserve de ciel étoilé du Mont-Mégantic et de ses trois zones.

du patrimoine bâti (American Medical Association, 2016; Aubé et collab., 2013; Bruce-White et Shradlow, 2011; Hölker et collab., 2010; Robert et collab., 2015; Sibley, 2008). Ce phénomène est en croissance. Une étude récente a calculé que de 2012 à 2016, la pollution lumineuse a augmenté en moyenne de 2,2 % dans les endroits éclairés artificiellement (Kyba et collab., 2017), et rien n'indique une stabilisation de la situation à court ou moyen terme.

Afin de contrer ce phénomène et de protéger la qualité des observations astronomiques au mont Mégantic, la première Réserve internationale de ciel étoilé (RICEMM) au monde y a été créée en 2007, en partenariat avec 35 municipalités, 2 municipalités régionales de comté (MRC) et la ville de Sherbrooke (Labrecque, 2018; figure 1). La pérennisation de l'Observatoire de recherche du Mont-Mégantic a été une préoccupation centrale dans la démarche; cependant, le mandat de la RICEMM s'est rapidement transformé pour inclure la question de la protection des paysages nocturnes. En effet, il n'y a pas que l'astronomie qui ait besoin de nuit: depuis des millions d'années, l'alternance de la lumière et de l'obscurité rythme le développement du vivant. Ce n'est donc pas une surprise si un nombre grandissant d'études

dénotent aujourd'hui des conséquences significatives reliées à la fragmentation des environnements nocturnes (Granier, 2012; Longcore et Rich, 2017; Lyytimäki, 2013). Désignée comme la « zone cœur » de la RICEMM, le parc national du Mont-Mégantic est un endroit tout indiqué pour de nombreux projets d'études et de mesures concernant le ciel nocturne. À l'instar de plusieurs parcs nationaux américains qui ont vu la mise en place d'initiatives de protection du ciel étoilé, il est clair aujourd'hui que ce patrimoine culturel et naturel est un enjeu de conservation incontournable pour les aires protégées (Exmoor National Park, 2018; Longcore et Rich, 2017; National Park Service, 2018a; Parcs Canada, 2017; Parc national des Pyrénées, 2018).

Les répercussions de la pollution lumineuse sur la conservation du ciel nocturne ainsi que sur la faune et la flore étant maintenant reconnues (Cabrera-Cruz et collab., 2018; International Dark-Sky Association, 2018b; Schroer et Holker, 2016), il apparaît prioritaire pour la pérennité de la RICEMM de bien mesurer l'état de la qualité du ciel nocturne ainsi que son évolution. C'est donc dans ce contexte qu'ont été lancés en 2017, à l'occasion du 10^e anniversaire de la RICEMM, des travaux plus poussés de mesures et de recherche.

Objectifs

Plusieurs objectifs ont été visés lors de ces travaux :

- mesurer la pollution lumineuse par différentes approches et instruments complémentaires et non par une seule méthode;
- vérifier si la pollution lumineuse a augmenté, diminué ou est restée stable de 2007 à 2017, c'est-à-dire au cours des 10 premières années d'existence de la RICEMM;
- évaluer si une différence est présente entre la mesure de la pollution lumineuse au zénith du mont Mégantic et celle pour l'ensemble du ciel visible de cet endroit;
- dix ans après la première phase de conversion d'éclairage, quantifier la proportion de sources de pollution lumineuse (luminaires routiers encore non conformes) dans les zones 1 et 2 (figure 1).

Il est important de noter que l'objectif du présent article n'est pas de faire le tour de la question (voir Hänel et collab., 2017 pour une revue détaillée des différentes mesures de la pollution lumineuse), mais bien de présenter les principaux résultats obtenus en 2017 au mont Mégantic.

Matériel et méthodes

La mesure de la pollution lumineuse est une science récente qui verra probablement encore des développements dans les prochaines années. Mentionnons, par exemple, l'acquisition de données par des satellites comme le « *Visible Infrared Imaging Radiometer* » (VIIRS), comme une méthode possible de mesure (Levin et Zhang, 2017).

Contexte méthodologique

La pollution lumineuse est facilement observable au-dessus des villes, où d'importants dômes lumineux sont créés. Un second exemple notoire concerne l'illumination du ciel nocturne au-dessus des stations de ski alpin lorsqu'elles sont ouvertes en soirée. La prise de données dans le cas de la pollution lumineuse diffuse est réalisée directement vers le ciel. Les données recueillies peuvent par la suite être comparées avec ce qui constitue un ciel nocturne « naturel », c'est-à-dire exempt de lumière artificielle. Le nombre d'étoiles visibles ou d'autres systèmes de classification, comme l'échelle de Bortle, sont aussi utilisés pour quantifier le phénomène (Bortle, 2006).

La mesure de l'illumination artificielle du ciel nocturne présente d'importants défis. L'influence humaine doit être départagée des sources naturelles de luminosité comme la Lune, la Voie lactée, la lumière zodiacale (voir NASA, 2007) ou même la luminescence nocturne en haute atmosphère (Oliva et Origlia, 1992). De plus, la présence d'humidité et de nuages va considérablement faire varier les données de brillance du ciel. Quant à la pollution atmosphérique, il s'agit d'un facteur très difficile à isoler; les données du réseau de surveillance AERONET de la NASA peuvent être utilisées lorsqu'une station est à proximité (U.S. Department of Energy, 2017).

Pour faire le suivi de la situation sur le territoire de la RICEMM, nous avons considéré deux aspects complémentaires de la pollution lumineuse (Hollan, 2009; Luginbuhl et collab.,

2009) : la source des émissions (l'origine de la pollution) et la lumière diffuse résultante (la contamination engendrée par cette pollution dans un milieu donné).

Dans le premier cas, on considère directement les sources lumineuses (luminaires, ampoules, projecteurs, etc.). Lorsque le design de l'éclairage est déficient ou qu'il ne correspond pas au besoin (par exemple, à cause d'une mauvaise orientation du flux lumineux, d'une puissance excessive, d'une période d'éclairage inadéquate ou d'une couleur inappropriée; American Astronomical Association, 2016; Gaston et collab., 2012; Luginbuhl et collab., 2013), ces sources peuvent générer une nuisance directe pour un observateur, en plus de contribuer plus largement à la pollution lumineuse. On parle alors de luminaires non conformes. Par exemple, un luminaire routier mal orienté peut éblouir les automobilistes à une intersection et réduire la sécurité des lieux pour les piétons. Lorsque c'est possible, ces sources peuvent être mesurées, inventoriées, identifiées et compilées. Des modélisations peuvent être aussi produites à partir de ces données (Aubé, 2014; Luginbuhl et collab., 2009).

Dans le second cas, on vise à mesurer l'illumination artificielle du ciel nocturne. Dans l'atmosphère, les flux lumineux résiduels se combinent et se diffusent en réagissant avec les molécules (d'eau, par exemple) et les particules fines : la pollution lumineuse est donc intimement liée à la présence de pollution atmosphérique et aux conditions météorologiques (Kyba et collab., 2011). La lumière artificielle peut provenir soit de sources émettant directement vers le ciel (par exemple un luminaire en forme de globe), soit être le résultat diffus de la réverbération au sol des flux lumineux sur des surfaces aux réflectances variées (asphalte, neige, végétation, eau, arbres, édifices) (Aubé, 2015; Aubé et Simoneau, 2018). La diffusion de cette lumière artificielle est aussi grandement influencée par la distribution spectrale de chaque technologie d'éclairage (U.S. Department of Energy, 2017).

Méthodologie retenue

Quatre indicateurs ont été analysés : deux visant des mesures à la source et deux ciblant des mesures de la pollution lumineuse diffuse.

Mesure à la source : image composite à haute résolution de l'horizon sur 360°

À l'aide d'une caméra dotée d'un téléobjectif (spécifications détaillées : caméra Nikon D800, objectif Nikon 180mm f/2.8 ED AF, ISO 6400 et temps d'exposition de 20 secondes à une ouverture de f/5.6), un panorama 360 degrés a été réalisé à partir du sommet du mont Mégantic lors de conditions atmosphériques propices (absence de nuages, faible taux d'humidité, absence de lune). Ce panorama à haute résolution, composé d'une centaine d'images prises la même nuit, permet d'identifier clairement les plus importantes sources lumineuses émettant de la lumière jusqu'à l'observateur situé au sommet, réduisant ainsi l'aspect naturel du ciel nocturne.

Mesure à la source : inventaire et géolocalisation de l'éclairage routier des zones 1 et 2

De 2005 à 2007, les travaux de mise en place de la RICEMM avaient mené à la conversion de plus de 3 300 luminaires publics et privés. Ces conversions visaient principalement des luminaires émettant de la lumière directement vers le ciel (par exemple des sentinelles de ferme) ou des luminaires routiers ayant une puissance trop élevée pour le besoin réel. La grande majorité de ces changements d'éclairage avaient eu lieu dans la zone 1 de la RICEMM (figure 1). Cependant, peu d'information était disponible concernant le nombre de luminaires encore problématiques, notamment dans la zone 2. L'éclairage du réseau routier étant reconnu comme une des principales sources de pollution lumineuse, c'est cette catégorie qui a été ciblée prioritairement. Munie d'une tablette électronique dotée d'un formulaire de prise de données et d'un GPS intégré, Sarah Knefati, alors étudiante à la maîtrise de l'École de technologie supérieure de Montréal, a parcouru l'ensemble des routes des zones visées (l'ensemble de la RICEMM en excluant la ville de Sherbrooke) afin de caractériser chacun des luminaires routiers (modèle, puissance, etc.) (Knefati, 2017).

Pollution lumineuse diffuse : acquisition de données avec le SQM-LE

Un *Sky Quality Meter* (SQM) de la compagnie canadienne Unihedron a été installé en juin 2016 au sommet du mont Mégantic, à proximité de l'observatoire afin de pouvoir le connecter au réseau Internet et à l'électricité. Cet instrument, qui capte la brillance du ciel au zénith, présente plusieurs avantages : il est relativement peu dispendieux, est utilisé à de nombreux endroits dans le monde, notamment dans d'autres réserves de ciel étoilé, et est recommandé par l'International Dark-Sky Association. Le modèle « LE » permet de prendre des données à intervalles prédéterminés. Chaque nuit, pendant toute l'année, des relevés de la brillance du ciel sont faits chaque minute.

Pollution lumineuse diffuse : Photographie du ciel selon la méthode NPS

Le *National Park Service* (NPS) américain est un pionnier dans le domaine de la mesure de la pollution lumineuse. En effet, depuis 2001, des relevés ont été faits dans plus d'une centaine de parcs et monuments nationaux (National Park Service, 2018b). Une caméra munie d'un dispositif de transfert de charge (« *charged-coupled device camera* », ou CCD) est utilisée pour générer une mosaïque photographique du ciel, qui est par la suite traitée avec différentes techniques et filtres afin d'obtenir le résultat le plus proche de ce que l'œil humain perçoit (Duriscoe, 2013; Duriscoe et collab., 2007; National Park Service, 2018b). Un indicateur est calculé à partir de ces données : le *Sky Quality Index* (National Park Service, 2018c). Cette manipulation doit être réalisée dans des conditions atmosphériques et météorologiques optimales. Après plusieurs tentatives reportées en raison de conditions

météorologiques défavorables, le chercheur Jeremy White de l'Université du Colorado (affilié au NPS) a finalement réussi à installer la caméra sous un ciel presque parfait à 22 h 40 le 22 septembre 2017. Il s'agissait d'une occasion extraordinaire de reproduire les mesures réalisées 10 ans plus tôt, vers 22 h 45 le 19 septembre 2007, lors de la création de la RICEMM et dans des conditions presque identiques.

Résultats et discussion

Mesure à la source

Image composite à haute résolution de l'horizon sur 360°

Le panorama composé de l'ensemble de l'horizon visible à partir du sommet du mont Mégantic, en date du 23 février 2017, a permis de localiser précisément les sources lumineuses affectant le ciel nocturne en croisant les azimuts des photos et les zones habitées. Nous avons ainsi réalisé une carte de travail (non illustrée) localisant ces sources ponctuelles.

Un exemple concret de retombées découlant de ce résultat est le travail de conversion de certaines de ces sources dès 2017 dans le cadre d'une collaboration avec Nature Cantons-de-l'Est, un organisme environnemental de l'Estrie. Il sera très intéressant de refaire cette analyse dans quelques années pour pouvoir visualiser les progrès accomplis à la suite du travail de conversion en cours ou, à l'inverse, pour vérifier si de nouveaux éclairages non conformes ont été installés.

Inventaire et géolocalisation de l'éclairage routier des zones 1 et 2

Plus de 4 400 luminaires routiers ont été inventoriés à l'été 2017 dans les zones 1 et 2 de la RICEMM. Le taux de conformité pour chaque zone a été défini comme le rapport entre le nombre de luminaires conformes sur le nombre total de luminaires de la zone visée. Pour la zone 1, on obtient un taux de conformité de 94 % (1 754 dispositifs d'éclairage routier ont été relevés et 1 646 étaient considérés comme conformes). Dans la zone 2, 2 669 luminaires ont été inventoriés et 680 ont été jugés conformes, pour un taux de conformité de 25 % (Knefati, 2017). On obtient un taux de conformité combiné de 53 % pour les zones 1 et 2.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la majeure partie des efforts de conversion en 2005-2006 avait eu lieu dans la zone 1; sans surprise, le taux de conformité de cette zone était donc très élevé. À l'inverse, nous nous attendions à un taux de conformité relativement bas pour la zone 2, mais pas à une valeur aussi faible que le 25 % obtenu. Cette valeur nous indique clairement que beaucoup de travail reste à faire pour convertir les sources de pollution lumineuse dans cette zone. Grâce à ces résultats, et puisque les coûts de remplacement d'un luminaire routier sont connus, il est maintenant possible d'estimer les coûts associés à la conversion des 2 074 dispositifs d'éclairage routier non conformes.

Mesures de la pollution lumineuse diffuse

Acquisition de données avec le SQM-LE

L'importante quantité de données accumulées dans le cadre de l'utilisation du SQM-LE a permis de tracer un portrait global de la qualité du ciel au mont Mégantic au zénith. Lors de l'analyse des données, sur plus de 260 000 mesures, on constate que le mode se situe à 21,6 de magnitude/arcsec². Cette valeur inclut cependant une grande quantité de relevés lorsque la Lune et la Voie Lactée sont présentes et qu'une luminosité est visible à l'horizon (aube et crépuscule). En utilisant les éphémérides du Soleil et de la Lune ainsi que les coordonnées galactiques pour cibler les périodes où la Voie Lactée n'est pas au zénith, il a été possible de soustraire les biais associés. Les résultats obtenus indiquent alors une valeur tendant vers 22,0 de magnitude/arcsec², ce qui est considéré comme un ciel noir de grande qualité (Duriscoe, 2016).

Afin de vérifier que les nuages n'affectaient pas ces résultats, plusieurs vérifications sur le terrain ont permis de confirmer que, lors des nuits optimales (taux d'humidité très bas, absence de nuages), le 22,0 de magnitude/arcsec² était bel et bien atteint. L'influence de la présence de polluants atmosphériques ainsi que celle de la luminescence nocturne de haute atmosphère, qui devrait contribuer à augmenter la pollution lumineuse, n'ont pu être analysées. Toutefois, comme les résultats démontrent que le ciel au zénith est d'une grande qualité (22,0 de magnitude/arcsec²), nous n'avons pas jugé que ces facteurs étaient significatifs. Des analyses supplémentaires devraient cependant être réalisées afin de confirmer cette conclusion.

Photographie du ciel selon la méthode NPS

De leur côté, les mesures réalisées par le chercheur J. White permettent de faire une comparaison précise, chiffrée tout autant que visuelle, entre 2007 (Moore et Luginbuhl, 2007) et 2017 (figures 2 et 3). Le constat est sans équivoque : la situation est visuellement très similaire d'une image à l'autre, et l'indice de qualité du ciel (*Sky Quality Index*, ou SQI) est identique d'un relevé à l'autre (valeur de 82,8).

Comme on l'a vu précédemment, les résultats du SQM-LE se limitent à la mesure de la pollution lumineuse diffuse au zénith, alors que nous cherchions aussi à savoir si la situation serait similaire pour l'ensemble du ciel. Comme le SQI est demeuré le même de 2007 à 2017, on peut donc affirmer que la qualité du ciel a été maintenue tant au zénith que pour l'ensemble du ciel. Cela signifie que les gains importants réalisés lors de la mise en place de la RICEMM plus de 10 ans auparavant (voir Aubé, 2014) ont été maintenus, malgré une croissance de 8 % de la population sur le territoire de 2007 à 2017 (Gazette officielle du Gouvernement du Québec, 2007; Gazette officielle du Gouvernement du Québec, 2017). C'est finalement cette mesure de l'ensemble du ciel qui a été retenue dans le cadre du Programme de suivi des indicateurs environnementaux de Parcs Québec, afin de bien

suivre l'évolution de l'enjeu de conservation que constitue la protection du ciel étoilé du parc national et de la réserve.

Conclusion

Malgré une croissance de la pollution lumineuse partout sur la planète, les 10 dernières années dans la RICEMM ne semblent pas avoir suivi cette tendance. En effet, tant au zénith que pour l'ensemble du ciel, les mesures récentes de la pollution lumineuse diffuse confirment sans équivoque que les niveaux d'éclairement nocturne n'ont pas augmenté au mont Mégantic. Ces mesures devront cependant être répétées dans le futur afin de suivre l'évolution de la situation (par exemple, en collaborant de nouveau avec le NPS en 2027 afin de prendre d'autres images avec la même méthodologie). Par ailleurs, beaucoup de travail reste à faire pour améliorer le taux de conformité des luminaires routiers sur le territoire à l'étude (zones 1 et 2). Les sources de pollution lumineuse restent encore nombreuses dans la RICEMM. Grâce au suivi des panoramas photographiques, ce travail pourra aussi cibler le plus possible les dispositifs d'éclairage affectant le paysage nocturne visible du sommet du mont Mégantic. Enfin, un projet de recherche se poursuit actuellement pour tenter de combiner une quantité importante de données (comme avec le SQM-LE) et des relevés complets du ciel (comme avec la méthode NPS). Ce nouvel instrument, une caméra CCD à relevés continus, permettrait de profiter au maximum des occasions de prendre des données de qualité et ouvrirait la porte à la création d'animations visuelles afin de mieux vulgariser les résultats et de poursuivre le travail de sensibilisation concernant cet enjeu majeur de conservation. ◀

Références

- AMERICAN ASTRONOMICAL ASSOCIATION, 2016. Résolution de l'Association astronomique américaine (AAS) pour supporter les éclairages respectueux du ciel étoilé. Disponible en ligne à : https://lowell.edu/wp-content/uploads/2017/01/aas229_LP_resolution_jan2016.pdf.
- AMERICAN MEDICAL ASSOCIATION, 2016. Human and environmental effects of light emitting diode (LED) community lighting. Disponible en ligne à : http://darksky.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/AMA_Report_2016_60.pdf.
- AUBÉ, M., 2014. Sky brightness levels before and after the creation of the first International Dark Sky Reserve. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139: 52-63.
- AUBÉ, M., 2015. Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol. 370: 20140117. DOI:10.1098/rstb.2014.0117
- AUBÉ, M. et A. SIMONEAU, 2018. New features to the night sky radiance model illumina: hyperspectral support, improved obstacles and cloud reflexion. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 211: 25-34.
- AUBÉ, M., M. KOCIFAJ et J. ROBY, 2013. Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. *PLOS ONE*, 8 (7): e67798.
- BORTLE, J.E., 2006. Gauging light pollution: The Bortle Dark-Sky Scale. Disponible en ligne à : <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/light-pollution-and-astronomy-the-bortle-dark-sky-scale/>.
- BRUCE-WHITE, C. et M. SHRADLOW, 2011. A review of the impact of artificial light on invertebrates. *The Invertebrate Conservation Trust*, 32 p. ISBN 978-1-904878-99-5.

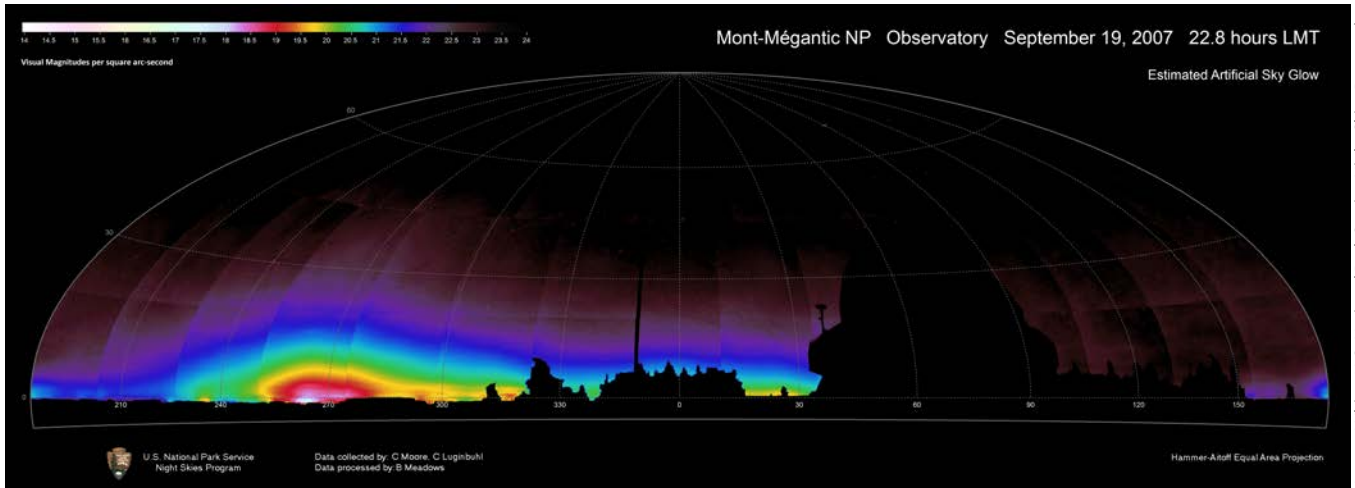


Figure 2 : Image composite de 2007 réalisée par le National Park Service et l'Université du Colorado. Le niveau de pollution lumineuse est illustré avec un dégradé de couleur dont l'échelle évolue dans un ordre précis: blanc, rose, rouge, jaune, vert, bleu et, finalement, violet. Cette échelle de couleurs montre de façon décroissante la pollution lumineuse.

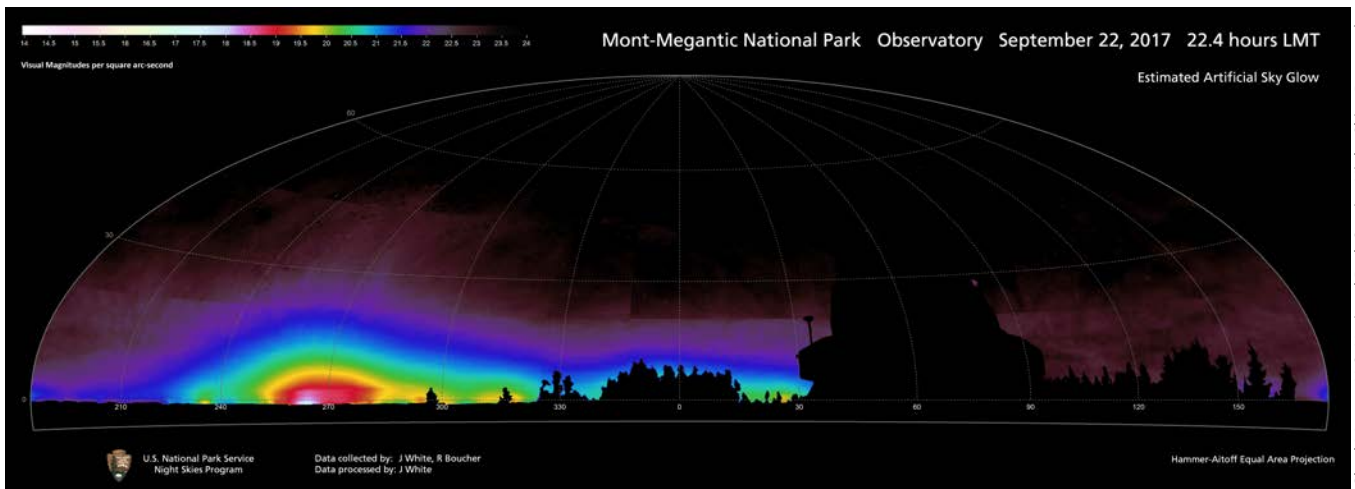


Figure 3 : Image composite de 2017 réalisée par le National Park Service. Le niveau de pollution lumineuse est illustré avec un dégradé de couleur dont l'échelle évolue dans un ordre précis: blanc, rose, rouge, jaune, vert, bleu et, finalement, violet. Cette échelle de couleurs montre de façon décroissante la pollution lumineuse.

CABRERA-CRUZ, S.A., J.A. SMOLINSKY et J.J. BULER, 2018. Light pollution is greatest within migration passage areas for nocturnally-migrating birds around the world. *Nature Scientific Reports*, volume 8, 3261. Disponible en ligne à : <https://www.nature.com/articles/s41598-018-21577-6>.

CHUN, S.J.P., W.S. CHU, Y.L. WAI et F.W. CHUNG, 2014. 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*, 139: 90-108.

DURISCOE, D.M., 2013. Measuring anthropogenic sky glow using a natural sky brightness model. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125 (933): 1370-1382.

DURISCOE, D.M., 2016. Photometric indicators of visual night sky quality derived from all-sky brightness maps. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 181, doi:10.1016/j.jqsrt.2016.02.022.

DURISCOE, D.M., C.B. LUGINBUHL et C.A. MOORE, 2007. Measuring night-sky brightness with a wide-field CCD camera. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119: 192-213.

EXMOOR NATIONAL PARK, 2018. Exmoor International Dark Sky Reserve. Disponible en ligne à : <http://www.exmoor-nationalpark.gov.uk/about-us/press-room/press-room/news-2011/international-dark-sky-reserve>.

FALCHI, F., C. PIERANTONIO, D.M. DURISCOE, C.M. Kyba, C.D. ELVIDGE, K. BAUGH, B.A. PORTNOV, N.A. RYBNIKOVA et R. FURGONI, 2016. The New World Atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, Vol. 2 (6): e1600377. DOI:10.1126/sciadv.1600377.

GASTON, K.J., T.M. DAVIES, J. BENNIE et J. HOPKINS, 2012. Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments. *Journal of Applied Ecology*, 49: 1256-1266.

GAZETTE OFFICIELLE DU GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2007. 139^e année, n^o 152, p. 5943-5971.

GAZETTE OFFICIELLE DU GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2017. 149^e année, n^o 152, p. 5999-6024.

Jeremy White, U.S. National Park Service Night Skies Program

Chad Moore, U.S. National Park Service Night Skies Program

- GRANIER, H., 2012. Comment prendre en compte la pollution lumineuse dans l'identification des continuités écologiques? Rapport de stage, Parc naturel régional des Causses du Quercy. Disponible en ligne à : <http://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/comment-prendre-compte-pollution-lumineuse-dans>.
- HÄNEL, A., T. POSCH, S.J. RIBAS, M. AUBÉ, D.M. DURISCOE, A. JECHOW, Z. KOLLATH, D.E. LOKEMA, C.M. MOORE, N. SCHMIDT, H. SPOELSTRA, G. WUCHTERL et C.C.M. KYBA, 2017. Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205 : 278-290.
- HÖLKER, F., C. WOLTER, E.K. PERKIN et K. TOCKNER, 2010. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 25 (12) : 681-682.
- HOLLAN, J., 2009. What is light pollution, and how do we quantify it? Disponible en ligne à : http://amper.ped.muni.cz/light/lp_what_is.pdf.
- INTERNATIONAL DARK-SKY ASSOCIATION, 2018a. Light pollution. Disponible en ligne à : <http://www.darksky.org/light-pollution/>.
- INTERNATIONAL DARK-SKY ASSOCIATION, 2018b. Light pollution effects on wildlife and ecosystems. Disponible en ligne à : <http://darksky.org/light-pollution/wildlife/>.
- JIN, H., J. SHANGZHONG, L. CHEN, S. CEN et K. YUAN, 2015. Research on the lighting performance of LED street lights with different color temperatures. *IEEE Photonics Journal*, 7 (6) : 1601309.
- KNEFATI, S., 2017. Évaluation de la pollution lumineuse et des mesures de réduction au mont Mégantic. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, 69 p.
- KYBA, C.C.M., J. FISCHER, F. HÖLKER et T. RUHTZ, 2011. Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems, *PLOS One*, 6 (3) : e17307.
- KYBA, C.C.M., T. KUESTER, A.S. MIGUEL, K. BAUGH, A. JECHOW, F. HÖLKER, J. BENNIE, C.D. ELVIDGE, K.J. GASTON et L. GUANTER, 2017. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent, *Science Advances*, 3 (11) : e1701528. doi:10.1126/sciadv.1701528.
- LABRECQUE, A., 2018. Sous un ciel étoilé. Québec Science. Disponible en ligne à : http://www.quebecscience.qc.ca/reportage_qs/Sous-un-ciel-etoile.
- LEVIN, N. et Q. ZHANG, 2017. A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas. *Remote Sensing in Environment*, 190 : 366-382.
- LONGCORE, T. et C. RICH, 2017. Artificial night lighting and protected lands: ecological effects and management approaches. *Natural Resource Report*, NPS/NRSS/NSNS/NRR 2017-1493. National Park Service, Fort Collins, Colorado, 41 p.
- LUGINBUHL, C.B., G.W. LOCKWOOD, D.R. DAVIS, K. PICK et J. SELDERS, 2009. From the ground up I: light pollution sources in Flagstaff, Arizona. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121 : 185-203.
- LUGINBUHL, C.B., P.A. BOLEY et D.R. DAVIS, 2013. The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139 : 21-26.
- LYYTIMÄKI, J., 2013. Nature's nocturnal services: Light pollution as a non-recognised challenge for ecosystem services research and management. *Ecosystem Services*, 3 : e44-e48. 10.1016/j.ecoser.2012.12.001.
- MOORE, C.M. et C.B. LUGINBUHL, 2007. Night sky quality monitoring report. Parc national du Mont-Mégantic, 22 septembre 2007. Disponible en ligne à : <http://www.sierranights.com/nightsky/reports/PCMM070920.html>.
- NASA, 2007. Exemple de lumière zodiacale. Disponible en ligne à : <https://apod.nasa.gov/apod/ap070925.html>.
- NATIONAL PARK SERVICE, 2018a. NPS Night Skies. Disponible en ligne à : <https://www.nps.gov/subjects/nightskies/index.htm>.
- NATIONAL PARK SERVICE, 2018b. NPS methods. Disponible en ligne à : <https://www.nps.gov/subjects/nightskies/methods.htm>.
- NATIONAL PARK SERVICE, 2018c. Night sky monitoring report metrics. Disponible en ligne à : <http://sierranights.com/nightsky/dataPageExplain.htm>.
- OLIVA, E. et L. ORIGLIA, 1992. The OH airglow spectrum: a calibration source for infrared spectrometers. *Astronomy and Astrophysics*, 254 : 466-471.
- PARC NATIONAL DES PYRÉNÉES, 2018. Atténuer la pollution lumineuse. Disponible en ligne à : <http://www.pyrenees-parcnational.fr/fr/des-actions/encourager-lexcellence-environnementale/lutter-contre-le-changement-climatique/attenuer>.
- PARCS CANADA, 2017. Parks and the Milky Way – Science and Conservation. Disponible en ligne à : www.pc.gc.ca/en/nature/science/conservation/ciel-sky.
- ROBERT, K.A., J.A. LESKU, J. PARTECKE et B. CHAMBERS, 2015. Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. *Proceedings of the Royal Society B*, 282 : 20151745. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.1745>.
- SCHROER, S. et F. HÖLKER, 2016. Impact of lighting on flora and fauna. Dans : KARLICEK, R., C.-C. SUN, G. ZISSIS et R. MA, (édit.). *Handbook of advanced lighting technology*, Springer, p. 957-989.
- SIBLET, J.-P., 2008. Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité. Synthèse bibliographique. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Service du Patrimoine Naturel, Département Écologie et Gestion de la Biodiversité, Rapport MNHN-SPN/MEEDDAT n° 8 : 29 p. Disponible en ligne à : http://spn.mnhn.fr/spn_rapports/archivage_rapports/2008/SPN%202008%20-%208%20-%20Rap-SPN%20POLLUX.pdf.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2017. An investigation of LED street lighting impact on skyglow. Pacific Northwest National Laboratory, 48 p. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/2017_led-impact-sky-glow.pdf.