

# Évolution de la pollution lumineuse à Montréal suivant la transition aux DEL

Jonathan Gagné<sup>1,2</sup>, Marc Jobin<sup>1</sup>, André Grandchamps<sup>1</sup>, Olivier Hernandez<sup>1</sup>, Martin Aubé<sup>3,4,5</sup>

<sup>1</sup> Planétarium Rio Tinto Alcan, Espace pour la vie, 4801, avenue Pierre-De Coubertin, Montréal, QC H1V 3V4, Canada

<sup>2</sup> Institut de recherche sur les exoplanètes, Université de Montréal, Département de physique,  
C.P. 6128 Succ. Centre-ville, Montréal, QC H3C 3J7, Canada

<sup>3</sup> Département de physique, Cégep de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1E 4K1, Canada

<sup>4</sup> Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1H 2R1, Canada

<sup>5</sup> Département de physique, Bishop's University, Sherbrooke, QC J1M 1Z7, Canada

## Rapport technique – Novembre 2021



L'île de Montréal la nuit, photographiée en février 2021  
depuis la Station spatiale internationale. Crédit : NASA.

### Sommaire exécutif :

*Nous avons analysé les données de la caméra VIIRS-DNB à bord du satellite Suomi NPP afin de mesurer la quantité de lumière reçue dans l'espace émise par les luminaires sur l'île de Montréal entre avril 2012 et mars 2020 et formuler des prévisions sur l'évolution de la pollution lumineuse à Montréal durant la transition aux luminaires utilisant les diodes électroluminescentes (DEL) initiée à l'automne 2017. Nous avons ainsi spécifiquement analysé les secteurs de Montréal où une fraction significative des luminaires ont été mis à jour avec la technologie DEL par le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal.*

*Notre analyse tient compte de divers facteurs comme les variations météorologiques et saisonnières, la différence entre la réponse spectrale des détecteurs de VIIRS-DNB et celle de l'œil humain, ainsi que les effets de la diffusion par l'atmosphère de la Terre. La caméra VIIRS-*

*DNB a observé une diminution du flux lumineux directionnel émis par unité de surface au sol (la radiance), d'environ 26 % suivant la transition aux luminaires DEL à Montréal. Cependant, les luminaires DEL ont une couleur plus bleutée mieux détectée par l'œil humain et non-détectée par VIIRS-DNB, surtout en conditions de faible luminosité. Nous avons investigué comment cette diminution du signal détecté par VIIRS-DNB se traduirait sur la quantité totale de radiance lumineuse détectable par l'œil humain se trouvant diffusée hors de la ligne de visée du satellite Suomi NPP et potentiellement vers une personne observant le ciel depuis le sol.*

*Nous déduisons qu'il est plausible que l'impact de la transition aux DEL par la Ville de Montréal ait un effet légèrement bénéfique (5 %) pour l'œil humain depuis le sol en situation très obscure, alors qu'en situation sombre typique de l'observation astronomique en zone urbaine, on calcule plutôt une diminution de la pollution lumineuse d'environ 15 %. Comme l'installation des luminaires DEL n'est pas encore complétée, nous prédisons que ce bénéfice d'environ 15 % pourrait atteindre 29 % lorsque la transition aux luminaires DEL sera complétée.*

*La direction du Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal a fait trois choix lesquels se sont avérés cruciaux pour ne pas aggraver la pollution lumineuse à Montréal durant la transition aux DEL : (1) on a opté pour des DEL à température d'éclairage de 3000 K; (2) des luminaires à éclairage directionnel vers le bas (« full cutoff ») ont été choisis; et (3) l'illuminance au sol des DEL a été réduite de 30 % sous la norme d'éclairage IES RP-8-14 étant donné la meilleure perception des couleurs offerte par les DEL qui améliore la visibilité à illuminance égale. Notre analyse suggère que l'omission d'une seule de ces trois stratégies aurait rendu la transition aux DEL nettement néfaste en termes de pollution lumineuse.*

*Notre analyse suggère également que la transition aux DEL aurait pu doubler, voire même tripler la pollution lumineuse observée depuis le sol à Montréal si elle n'avait pas été faite avec grand soin. Bien que ces résultats soient encourageants, ils indiquent aussi que toute transition à la technologie DEL représente un risque considérable pour la pollution lumineuse. De plus, il est plausible que les DEL à 5000 K souvent utilisées pour l'éclairage commercial, industriel ou domestique menacent d'effacer totalement le bénéfice encouru par la transition aux DEL faite par la Ville de Montréal. Il sera ainsi important de (1) réviser la norme d'éclairage au sol IES RP-8-14 qui était mieux adaptée aux luminaires au sodium; (2) mettre en place une réglementation limitant l'éclairage privé et commercial à haute température d'éclairage (> 3000 K) et possiblement l'orientation de l'éclairage; et (3) mener une campagne de sensibilisation auprès des citoyens corporatifs et du grand public sur l'utilisation judicieuse de l'éclairage à technologie DEL ou autre.*

*Notre analyse ne considère pas l'impact de l'éclairage dirigé vers l'horizon, mais se concentre plutôt sur l'éclairage vers le haut qui est ensuite diffusé dans d'autres directions par l'atmosphère terrestre. Étant donné que les luminaires à DEL pourraient mieux éclairer vers l'horizon dans certaines zones avec peu d'obstacles en hauteur, il est possible que notre analyse sous-estime l'impact négatif de la transition aux DEL sur la pollution lumineuse perçue au sol. Élucider cette question demandera cependant d'effectuer une modélisation qui tient compte des obstacles au sol, ou d'effectuer des mesures de pollution lumineuse depuis le sol.*

## Introduction

Au cours de l'année 2020, l'équipe du Planétarium Rio Tinto Alcan (PRTA) d'Es-pace pour la vie a étudié l'évolution de la pollution lumineuse à Montréal au cours de la transition aux diodes électroluminescentes (DEL) par la Ville de Montréal.

Pour ce faire, nous avons principalement eu recours aux données de la bande « jour/nuit » (« Day/Night Band », DNB) de la caméra « Visible Infrared Imaging Radiometer Suite » (VIIRS) à bord du satellite météorologique *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (*Suomi NPP*), placé en orbite héliosynchrone en 2011. Les données brutes du satellite ne sont toutefois pas accessibles au grand public; nous avons utilisé l'ensemble de données calibrées et présélectionnées disponibles par l'entremise de l'interface web Radiance Light Trends.<sup>1</sup>



Figure 1. Vue d'artiste du satellite *Suomi NPP*. Crédit : NASA

---

<sup>1</sup> <https://lighttrends.lightpollutionmap.info/>

## 1. Principes de base

Les luminaires utilisés traditionnellement pour l'éclairage urbain ont tendance à émettre une fraction significative de leur lumière vers le haut. Ceci représente non seulement un gaspillage d'énergie, mais la lumière se trouve alors à être diffusée dans l'atmosphère terrestre et redirigée en partie vers le bas, causant un dôme de pollution lumineuse sur plusieurs dizaines de kilomètres. On peut observer cet effet en se plaçant par exemple en périphérie d'une grande ville (30–50 km); on remarquera à l'horizon un « dôme » de lumière diffuse provenant de la ville en question.

L'augmentation graduelle du nombre et de la puissance des luminaires a eu pour conséquence de faire disparaître complètement les étoiles de notre quotidien, à l'exception d'une poignée d'entre elles très brillantes. Il est aussi exceptionnellement rare pour le grand public de pouvoir admirer la Voie lactée à l'œil nu, car son observation, auparavant possible à peu près partout, nécessite maintenant de se déplacer dans une réserve de ciel étoilé, à grande distance de toute source de pollution lumineuse. Cet appauvrissement graduel de notre environnement n'est pas négligeable; bien qu'à ce jour peu d'études se soient penchées sur ses effets, un consensus semble émerger comme quoi le fait de retirer de notre quotidien de telles visions d'une grande beauté que nous offre la nature pourrait avoir des conséquences directes sur notre santé mentale et physique (p. ex. voir [Wolf et al. 2020](#)), en plus d'affecter notre capacité à nous émerveiller, à susciter notre curiosité et à mettre en perspective notre place dans l'Univers.

Étant donné qu'il est difficile pour un public ayant passé sa vie à proximité d'une grande ville d'apprécier la différence majeure que représente cette disparition du ciel étoilé, on peut imaginer une situation analogue où tous les arbres seraient graduellement retirés de Montréal, de manière si subtile qu'il n'y a pas de prise de conscience soudaine par rapport à ce changement; pourtant, on s'imagine sans peine les effets néfastes s'installant aussi sournoisement sur le bien-être de la population. Nous soupçonnons fortement qu'un phénomène similaire s'est produit avec la disparition graduelle du ciel étoilé, ce qui a poussé notre équipe et d'autres avant nous à étudier la question et à chercher des pistes de solution qui nous permettraient de retrouver au moins une partie de cette beauté naturelle perdue et presque oubliée.

En plus de ces potentiels effets néfastes sur la psychologie humaine, il est plausible que la pollution lumineuse accrue cause une perturbation des cycles circadiens de l'être humain, en interférant par exemple avec la production de mélatonine, laquelle est fortement inhibée lorsque l'œil humain perçoit de la lumière de couleur bleue ([Sollars & Pickard 2015](#)). Cette hormone, normalement produite en fin de journée à mesure que notre œil reçoit de moins en moins de lumière bleue, joue un rôle important dans notre capacité à s'endormir et à obtenir une nuit de sommeil réparatrice.

D'autres études ont aussi récemment démontré que l'éclairage intense peut affecter les fonctions biologiques des plantes ([French-Constant et al. 2016](#)) et des in-

vertébrés ([Hölker et al. 2010](#)). Quelques études récentes ont même indiqué un lien possible entre la pollution lumineuse et les risques associés à certains cancers chez l'humain ([Keshet-Sitton et al. 2016](#), [Garcia-Saenz et al. 2018, 2019](#)).

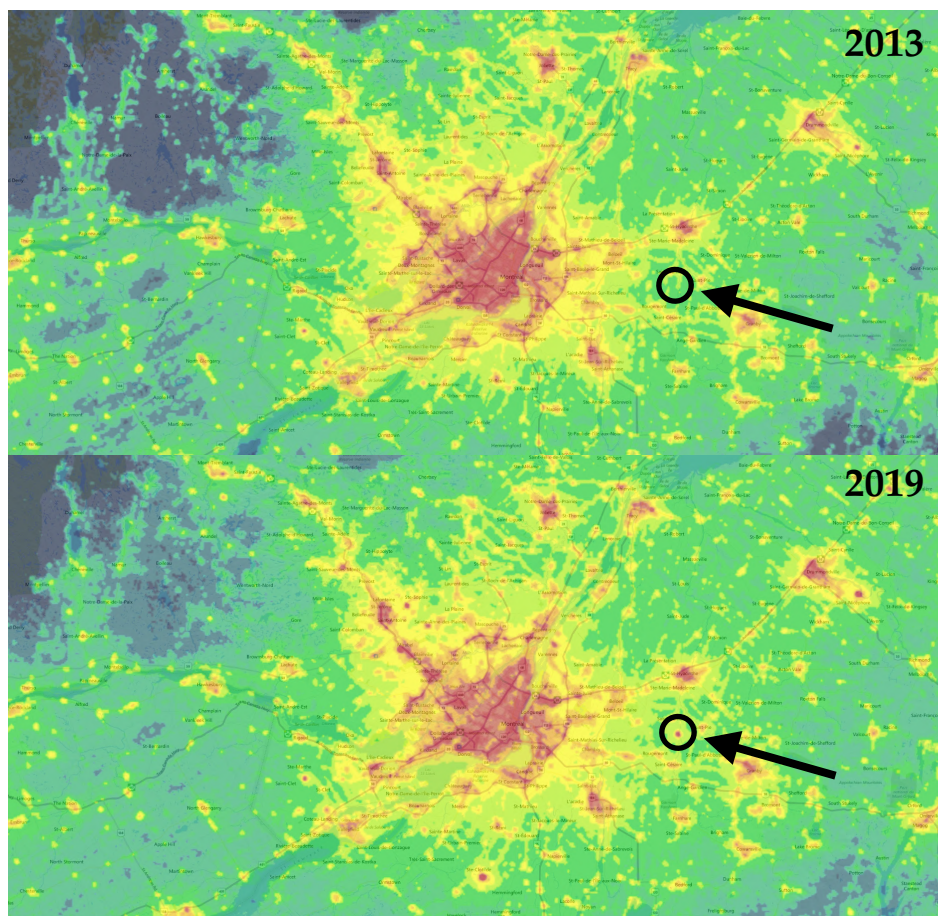
De récents développements dans la technologie des DEL ont poussé plusieurs municipalités à mettre à jour les luminaires publics qui utilisaient encore l'ancienne technologie des ampoules au sodium à haute pression. Les DEL présentent plusieurs avantages qui permettent de sauver en coûts énergétiques : par exemple, leur puissance peut être ajustée plus facilement et en temps réel; elles peuvent être plus facilement combinées avec un éclairage directionnel; et elles émettent une très petite fraction de leur énergie lumineuse aux longueurs d'ondes infrarouges, qui sont inutiles à la vision humaine et représentent donc un gaspillage énergétique, en plus de transférer une plus grande quantité de chaleur à leur environnement immédiat.

La Ville de Montréal a entrepris cette transition à la technologie des DEL à l'automne 2017; environ 68 % de tous les luminaires municipaux maintenus par la Ville de Montréal étaient adaptés en date du 15 juin 2020.

Dans ce rapport technique, nous nous pencherons sur une analyse de données satellite pour tenter de caractériser l'impact que ce changement a eu sur la quantité de lumière totale émise vers le ciel. Nous utiliserons ensuite des principes de base de spectroscopie pour traduire ces mesures et prédire l'impact perçu par l'œil humain dans une situation au sol et à proximité de la Ville de Montréal. Nous utiliserons ces résultats pour émettre une série de recommandations pour permettre à d'autres acteurs de réussir leur transition à la technologie des DEL, non seulement pour effectuer des économies en énergie, mais aussi pour réduire la pollution lumineuse et permettre au public de profiter à nouveau d'un ciel plus étoilé.



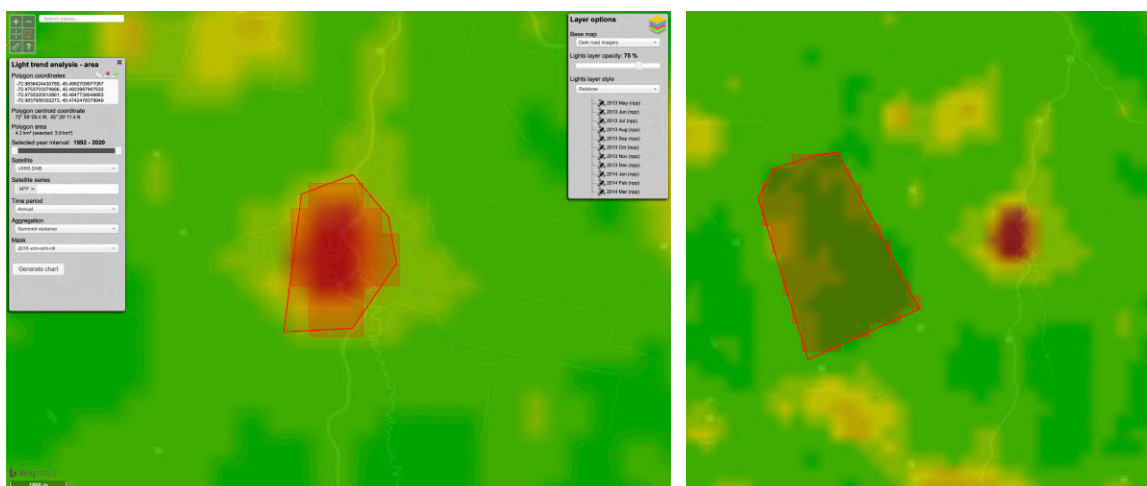
## 2. Collecte des données



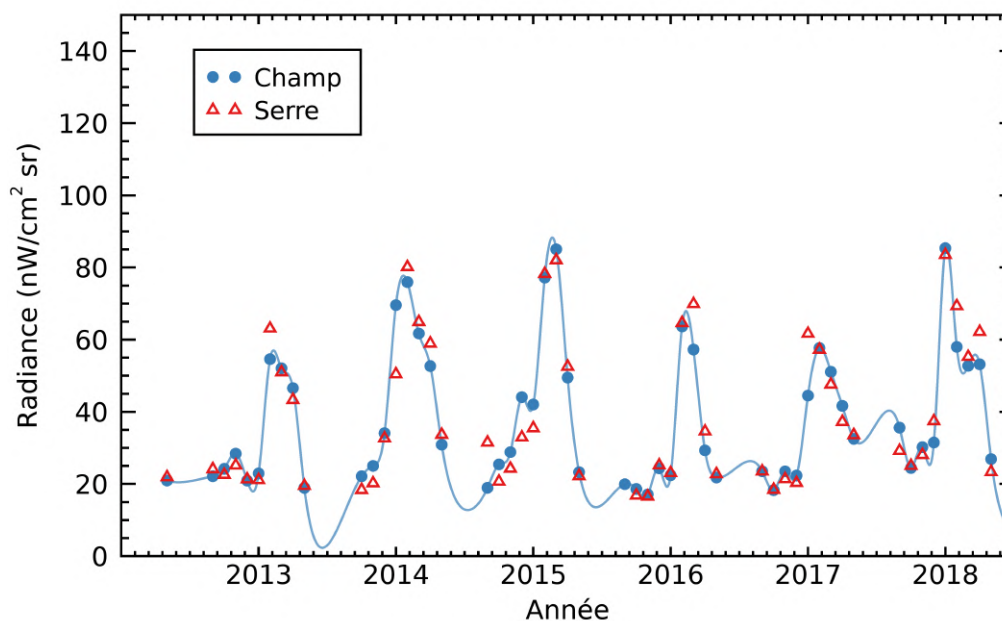
**Figure 2.** La grande région de Montréal selon Radiance Light Trends en 2013 (haut), puis en 2019 (bas). On y voit facilement apparaître de nouvelles sources de pollution lumineuse comme celle indiquée par la flèche noire.

Les données disponibles sur Radiance Light Trends ont été calibrées et nettoyées pour éliminer les artéfacts dus à la présence de nuages ou autres interférences, puis combinées en une mosaïque globale pour chaque époque, entre avril 2012 et mars 2020. Dans la figure 2 ci-dessus, on peut voir la mosaïque composite des années 2013 (panneau du haut) et 2019 (panneau du bas), où tous les mois de chaque année respective ont été combinés. La flèche noire indique une nouvelle source de pollution lumineuse apparue en Montérégie entre 2013 et 2019 : celle-ci correspond à une serre de tomates installée par Excel-Serres en 2019.

Afin d'illustrer les fonctions de l'outil Radiance Light Trends, nous avons sélectionné les pixels de la carte entourant la serre en question (figure 3), puis une autre région sombre dans les champs avoisinants pour servir de référence.



**Figure 3.** La sélection de deux polygones dans Radiance Light Trends, l'un centré sur la serre de tomates, l'autre sur une région sombre dans les champs avoisinants. Cette sélection permet d'exporter les données de radiance totale ("Aggregation: Summed radiance"; "Time period: Monthly"; "Mask: None"; "Radiance values: Weighted by area") en format "comma-separated values (csv)".

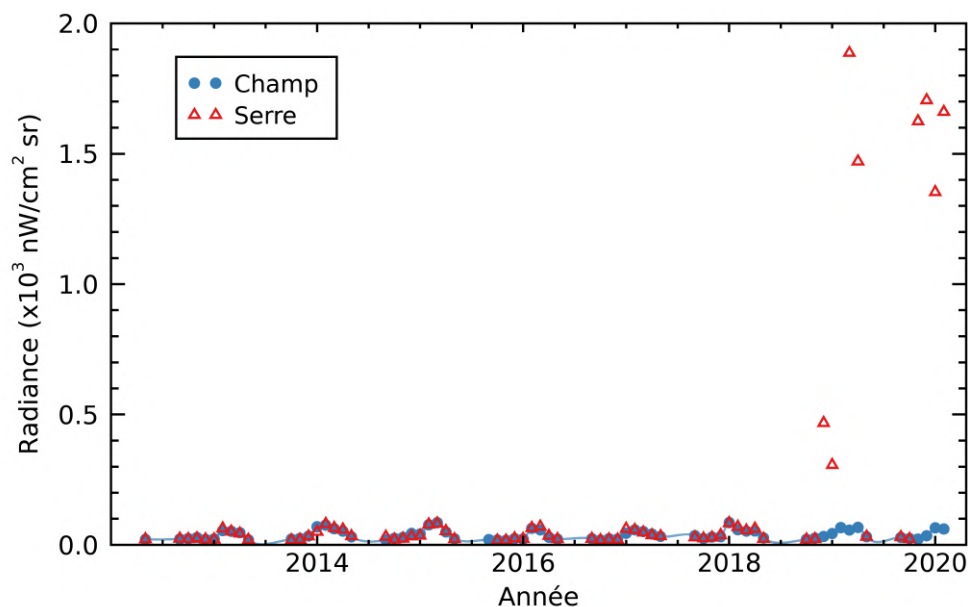


**Figure 4.** Radiance totale au fil du temps pour les deux régions de la carte centrées sur une région sombre des champs avoisinants (cercles bleus) et sur la serre de tomates (triangles rouges), avant l'apparition de la serre en 2019.

Les données extraites (figure 4) montrent clairement des variations saisonnières, mais on ne dénote aucune différence entre les deux polygones sélectionnés sur la carte avant l'apparition de la serre en 2019. Les variations saisonnières sont principalement dues à la présence de neige, laquelle augmente significativement la réflectivité du sol. Il est aussi plausible que des variations saisonnières moins importantes se produisent en

été, selon la densité du feuillage des arbres se trouvant directement au-dessus de luminaires.

La figure 5 illustre l'effet significatif de l'apparition de la serre sur la pollution lumineuse dans son voisinage immédiat : la radiance détectée par la caméra VIIRS-DNB<sup>2</sup> a augmenté d'un facteur 20 environ.



**Figure 5.** Radiance totale au fil du temps pour les deux régions de la carte centrées sur une région sombre des champs avoisinants (cercles bleus) et la serre de tomates (triangles rouges), incluant cette fois-ci la période suivant l'apparition de la serre.

On voit dans cet exemple que les variations saisonnières seront potentiellement problématiques pour produire une analyse détaillée de la pollution lumineuse, car l'augmentation en radiance détectée dépendra aussi de la quantité de neige présente dans l'image spécifique qui a été utilisée pour construire une région donnée dans la carte composite de l'interface de Radiance Light Trends. De plus, des points voisins mais distincts sur une même mosaïque mensuelle peuvent très bien avoir été construits à partir d'images prises à des dates différentes au cours du mois, selon la couverture nuageuse et la position du satellite. La quantité de neige présente dans chaque image-source peut ainsi varier selon la surface d'accumulation de neige disponible au sol, le moment dans l'année, et de la météo spécifique à l'époque de l'image choisie pour la région de la carte composite.

La présence de la neige aurait pu être bénéfique pour étudier la quantité de lumière projetée vers le sol par rapport à celle projetée directement vers le haut, mais l'incertitude causée par ces facteurs (quantité de neige et surface d'accumulation variables dans le temps et dans l'espace) ne nous permettrait pas de tirer des informations utiles des données VIIRS prises en hiver. Nous avons ainsi fait le choix d'utiliser seulement les

<sup>2</sup> Dans la suite de ce rapport, nous utiliserons VIIRS pour abrégé.



données obtenues entre le 6 juin et le 6 octobre de chaque année (voir la figure 6). Cette période restreinte permet d'éliminer toute contribution due à la neige, même aux hautes latitudes correspondant aux villes de Montréal (environ 45,5° Nord) et de Québec (environ 46,8° Nord), par exemple.

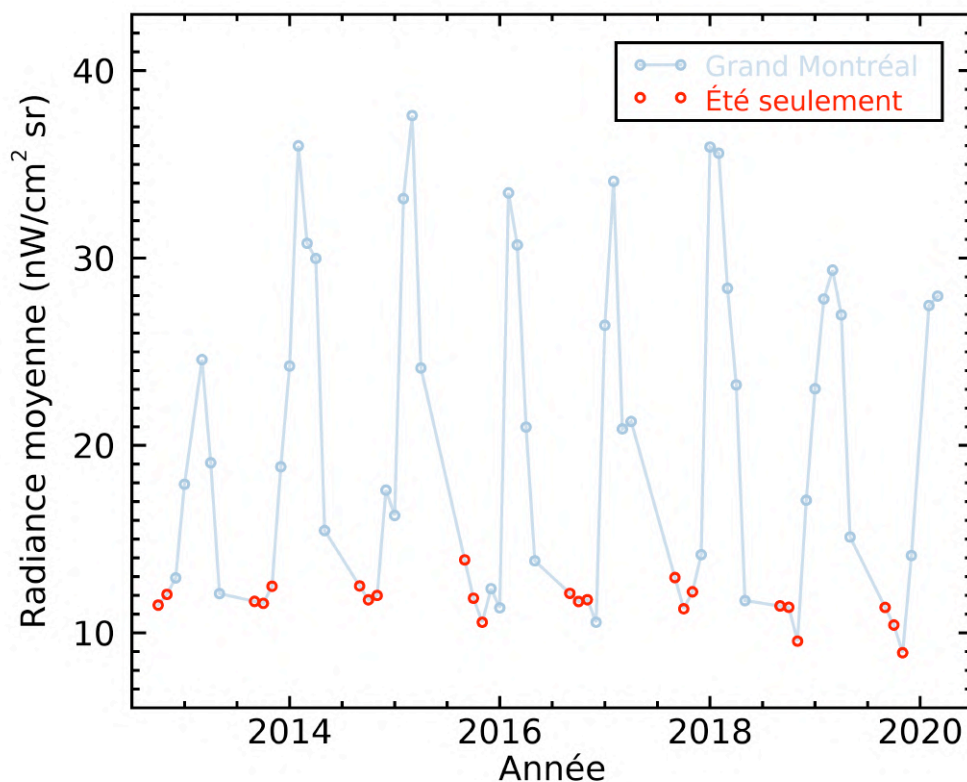


Figure 6. Radiance moyenne au fil des mois dans le Grand Montréal. Les cercles rouges indiquent les mois d'été que nous avons préservé pour notre analyse étant donné qu'ils sont moins affectés par les variations saisonnières principalement dues à la neige.

Deux autres subtilités doivent être prises en considération pour interpréter correctement les données fournies par Radiance Light Trends. D'abord, l'outil nous permet d'obtenir l'information de radiance sous trois formes : *sum*, *mean*, et *sum\_area\_weighted*. Les deux premières sont intuitives : *sum* correspond au total de la radiance détectée dans la région sélectionnée, et dépend ainsi de la taille de la sélection. La colonne *mean* correspond à la moyenne, c'est-à-dire la radiance totale divisée par le nombre de pixels sur la carte. La troisième colonne, *sum\_area\_weighted*, contient quant à elle la radiance totale corrigée selon la superficie au sol couverte par chaque pixel de VIIRS, qui peut varier selon leur position sur la carte. Étant donné que nous sommes intéressés par la radiance en tant que flux émis par unité de surface physique (en km<sup>2</sup>), et non par unité de surface en pixels, nous avons choisi de définir une nouvelle quantité :  $mean\_area\_weighted = mean \times sum\_area\_weighted / sum$ , et d'utiliser cette radiance moyenne, corrigée par unité de surface physique, pour la suite de notre analyse.

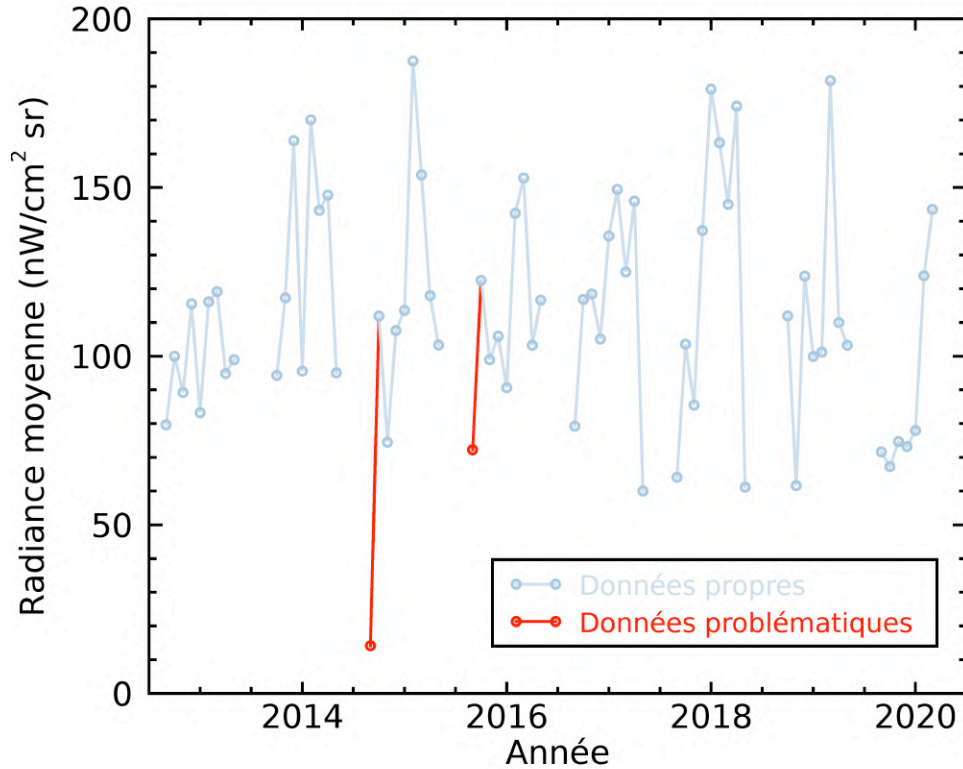
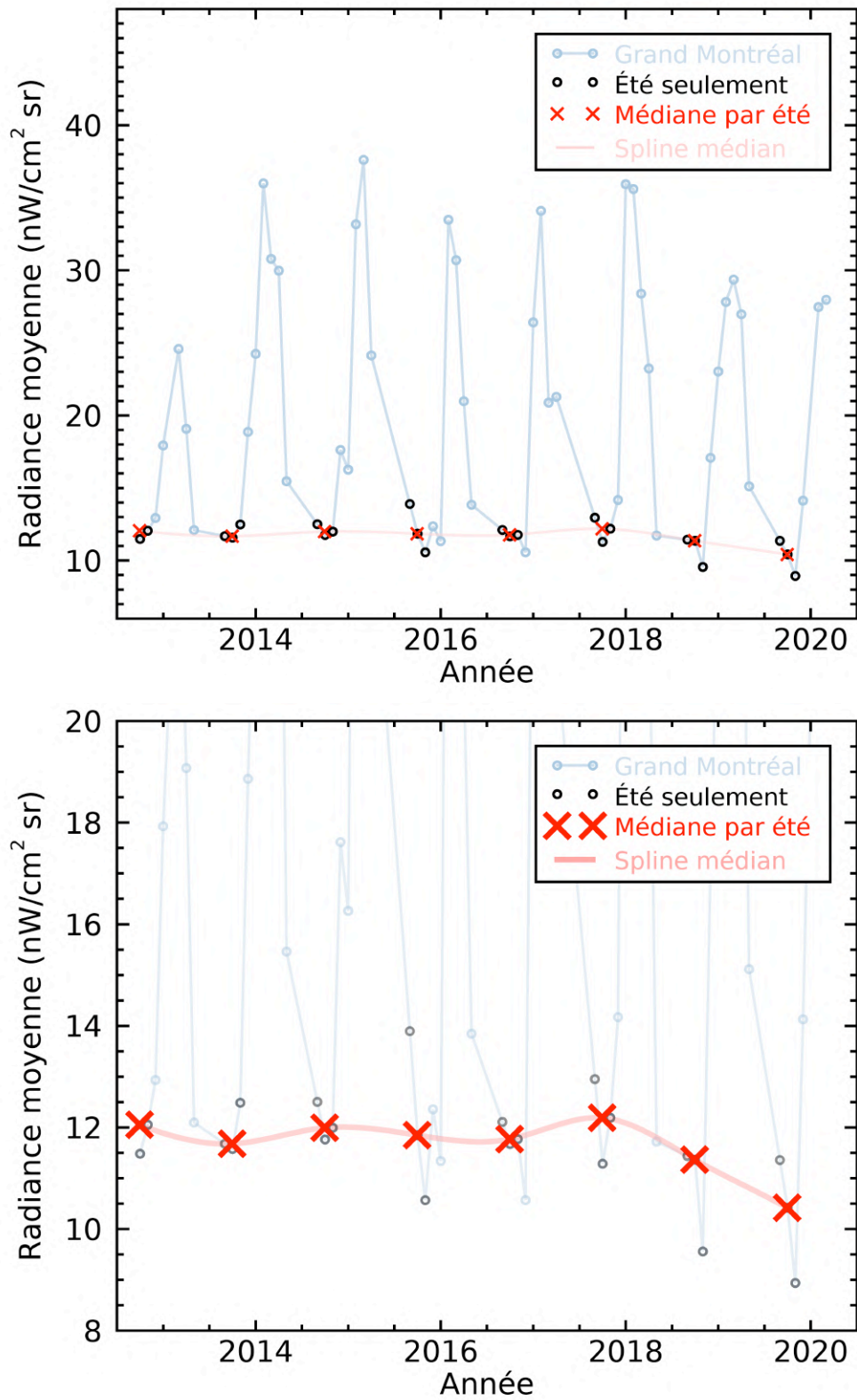


Figure 7. Radiance moyenne au fil des mois près du centre-ville de Montréal. On y voit deux mesures problématiques, indiquées en rouge, où trop peu d'images satellite ont été incluses pour effectuer la mesure, tel que décrit plus bas.

Une deuxième source de données problématiques concerne les régions des cartes composites qui ont été construites à partir d'un plus petit nombre d'images individuelles obtenues par VIIRS. L'interface web de Radiance Light Trends nous fournit une colonne *count*, indiquant le nombre d'images incluses dans chaque époque de la région choisie. Dans la plupart des cas, les époques sont construites à partir du même nombre d'images-sources (typiquement entre 20 et 100 images selon la région), mais on rencontre parfois une époque contenant moins de données, ce qui causera un pic négatif dans les valeurs de radiance, tel qu'illustré à la figure 7. Pour contourner ce problème, nous avons choisi d'éliminer toute époque contenant moins d'images que le 90<sup>e</sup> centile de la distribution du nombre d'images des autres époques.

En appliquant toutes les opérations décrites dans les paragraphes précédents, on peut obtenir une courbe de radiance par unité de surface en situation de bonne météo, sans neige, et observer les tendances à long terme de la pollution lumineuse dans une région choisie. Pour mettre l'accent sur cette tendance à long terme et éliminer les fluctuations à court terme, nous avons calculé la valeur médiane de la radiance à chaque été, et utilisé un *spline* pour les relier visuellement entre elles, tel que montré à la figure 8.



**Figure 8.** Radiance moyenne au fil des années dans le Grand Montréal. La figure du haut montre la valeur médiane de radiance par été en rouge en comparaison avec les variations saisonnières, et la figure du bas montre un gros plan sur la courbe rouge.

### 3. Diffusion atmosphérique

La diffusion atmosphérique de la lumière vient également compliquer l'analyse de données géospatiales telle que décrite précédemment. En effet, toute la lumière ne traverse pas l'atmosphère directement vers le haut, car en plus des réflexions possibles au sol et sur les objets présents dans l'environnement, l'atmosphère de la Terre redirige la lumière dans un cône dont l'angle d'ouverture dépend de la longueur d'onde (c. à d. la couleur) par l'effet de diffusion Rayleigh sur les molécules d'air, à laquelle s'ajoute la diffusion causée par les aérosols. En conséquence, une source de pollution lumineuse peut causer un « halo lumineux » qui affectera une grande région autour de celle-ci, comme le montre la figure 9 :

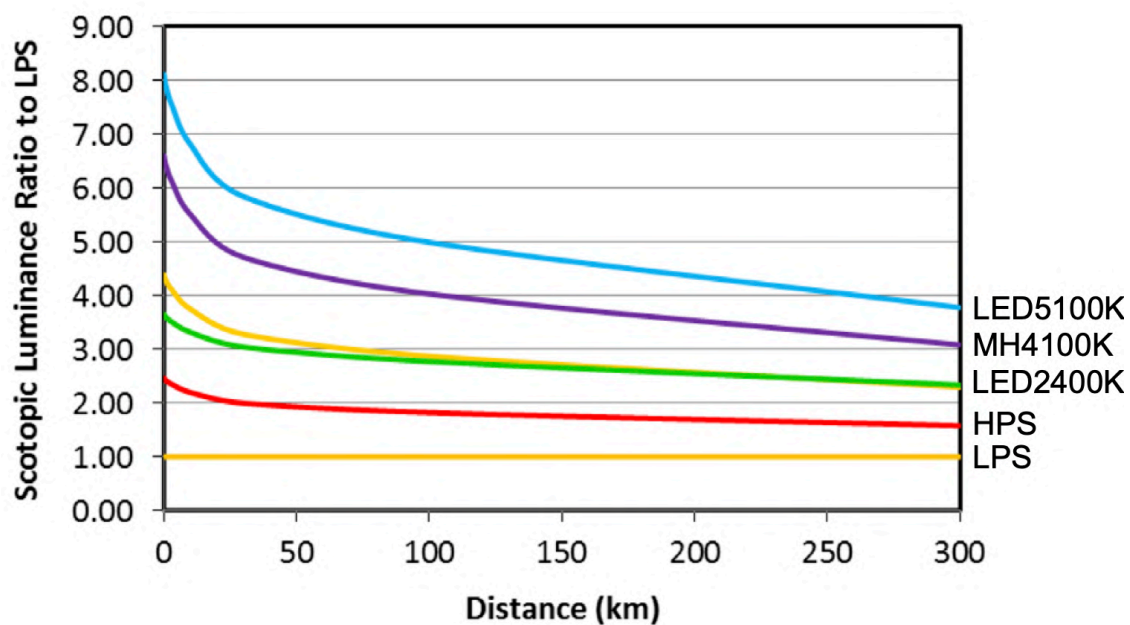


Figure 9. Une source de pollution lumineuse peut avoir un impact sur la qualité du ciel noir qui s'étend sur des dizaines de kilomètres, principalement à cause de la diffusion atmosphérique de la lumière. Ici, l'axe vertical montre la brillance du ciel telle que perçue par l'œil humain en conditions d'éclairage sombre. Les types d'éclairage qui émettent plus de lumière bleue, tels que les DEL à 5000 K, ont un impact plus important et qui s'étend plus loin, puisque la diffusion Rayleigh est plus efficace dans le bleu. Figure tirée de [Luginbuhl et al. \(2014\)](#).

Cependant, on peut tout de même identifier des différences significatives dans les données VIIRS à l'échelle de quelques kilomètres, malgré les effets de la diffusion atmosphérique. Par exemple, la pollution lumineuse causée par la serre de tomates dont nous avons discuté à la section 2 provient d'une source « ponctuelle » au sol, c'est-à-dire une source dont la surface est petite — ici environ 0,007 km<sup>2</sup> — alors que l'accroissement de luminosité par VIIRS ne couvre que 26 pixels, soit une surface d'environ 3,9 km<sup>2</sup>. Ceci indique que l'effet combiné de la diffusion atmosphérique et de la résolution



limitée de la caméra VIIRS (chaque pixel couvre environ 0,15 km<sup>2</sup> à proximité de Montréal) a été d'étendre l'impact de la source de lumière sur à peine deux kilomètres; il s'agit d'une quantité plutôt négligeable en regard des effets de diffusion atmosphérique perçus depuis le sol qui, comme on l'a vu plus haut, peuvent se faire sentir sur des dizaines de kilomètres.

L'étude de la pollution lumineuse depuis l'espace présente donc un net avantage puisqu'elle nous permet de mieux identifier les sources de pollution lumineuse individuelles; les observations depuis le sol nous renseigneraient plutôt sur une moyenne de toutes les sources de pollution lumineuse dans un voisinage très étendu, puisqu'on observe alors l'ensemble de la lumière diffusée, et non la lumière directe, provenant de toutes ces sources lumineuses.

Comme mentionné précédemment, ce processus de diffusion affecte les différentes couleurs (ou longueurs d'onde) de la lumière d'une façon distincte. Ceci est détaillé par [Aubé et al. \(2020; équations 5–7\)](#), où le facteur de transmission  $T$  de l'atmosphère, c'est-à-dire la fraction de lumière transmise à chaque longueur d'onde, est donnée par le produit de la transmittance moléculaire  $T_m$  et celle des aérosols  $T_a$  :

$$T = T_a T_m \quad (1)$$

Si on ignore l'effet relativement subtil de l'absorption de lumière par les molécules atmosphériques, la fraction de lumière diffusée est alors donnée par :

$$D = 1 - T = 1 - T_a T_m \quad (2)$$

La façon dont la transmittance moléculaire dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  est donnée par [Kneizys et al. \(1980\)](#) :

$$T_m = \exp \left( - \frac{1}{[115.6406 \text{nm}^{-4}] \lambda^4 - [1.335 \text{nm}^{-2}] \lambda^2} \right) \quad (3)$$

La transmittance due aux aérosols suit quant à elle la relation suivante :

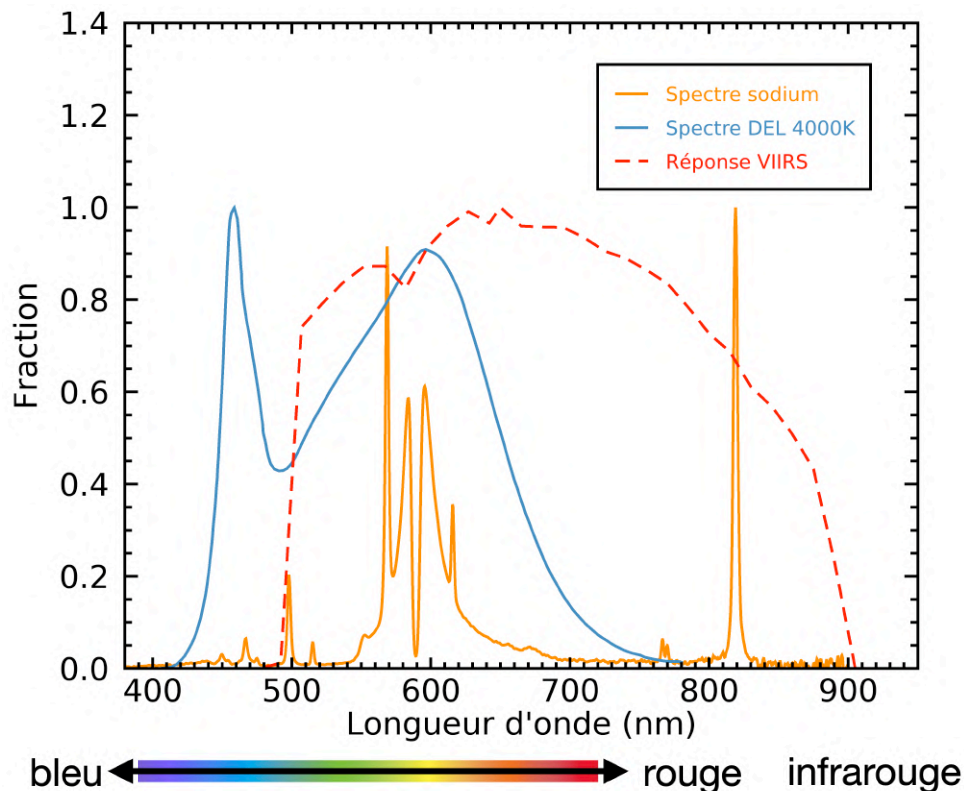
$$T_a = \exp \left( - \tau_{\text{ref}} \left( \frac{\lambda}{[500 \text{nm}]} \right)^{-\alpha} \right) \quad (4)$$

Nous avons choisi ici les paramètres  $\tau_{\text{ref}} = 0,1$  et  $\alpha = 1,0$ , appropriés pour le voisinage de l'île de Montréal ([Aubé et al. 2020](#)). Ces équations nous permettent de corriger légèrement la couleur de la lumière perçue par la caméra VIIRS, affectée par le facteur de transmission  $T$ , et aussi de corriger nos prévisions en utilisant le facteur  $D$ , comme nous le détaillerons à la prochaine section.

## 4. Réponse spectrale

Une complication additionnelle rend l'interprétation des données VIIRS un peu plus difficile : cette caméra a une sensibilité à la lumière qui est très différente de celle de l'œil humain. En particulier, la caméra VIIRS n'est pas sensible à la lumière bleue, tandis que l'œil humain y est très sensible, particulièrement en faibles conditions d'éclairage ambiant. Comme démontré par [Hung et al. \(2021\)](#), interpréter les données VIIRS en ignorant cette complication aurait pour effet de grossièrement sous-estimer l'impact des luminaires au DEL sur la pollution lumineuse perçue par l'œil humain depuis le sol.

On peut représenter ces effets en termes de « réponse spectrale », soit l'efficacité d'un appareil à détecter la lumière selon sa longueur d'onde. Dans la figure 10, on compare la réponse spectrale de VIIRS avec les spectres lumineux<sup>3</sup> d'une lampe DEL à 4000 K et celle d'une lampe au sodium, pour illustrer ce point :



**Figure 10.** Spectres lumineux d'une lampe au sodium (trait orange), comparé à celui d'une DEL à 4000 K (trait bleu). La réponse spectrale de la caméra VIIRS est représentée par un trait rouge pointillé; on voit qu'elle est surtout sensible aux longueurs d'ondes rouges de la lumière, et ne détecte pas une partie significative de la lumière bleue émise par la DEL.

<sup>3</sup> Dans ce rapport, nous ferons référence à la densité de flux spectral (en unités de Watts par mètre carré par nanomètre) lorsque nous utiliserons le terme « spectre lumineux ».

La notion de *spectre lumineux* sert à décrire la quantité de lumière de chaque couleur qui est émise par une source. Par exemple, une source lumineuse émettant la même quantité de lumière à chaque couleur (un spectre « plat ») nous apparaîtrait de couleur blanche. Si on séparait son faisceau à l'aide d'un prisme en verre, on observerait alors un arc-en-ciel dont chaque couleur aurait une intensité égale. En général, les sources lumineuses n'émettent pas qu'une seule couleur, mais un mélange continu de différentes gradations de couleurs; c'est pourquoi les spectres lumineux ressemblent généralement à une courbe lisse. La *réponse spectrale* représente l'autre aspect du problème de la détection de lumière, c'est-à-dire l'efficacité d'un récepteur à détecter chaque couleur d'un faisceau lumineux. Si on voulait par exemple répondre à la question « Quelle est la couleur du Soleil ? », il faudrait utiliser le spectre lumineux du Soleil et le combiner avec la réponse spectrale de l'œil humain. Vous devinerez ainsi que le Soleil pourrait apparaître d'une autre couleur pour un animal ou un instrument dont la réponse spectrale est très différente de l'œil humain.

À la différence d'une caméra typique, l'œil humain n'a pas une réponse spectrale fixe. En effet, sa réponse spectrale dépend de l'éclairage ambiant (ou plus précisément de la luminance locale). Ceci est une adaptation évolutive permettant à l'œil humain de détecter efficacement son environnement à la fois le jour et la nuit (voir p. ex. [Katti et al. 2019](#)). Lorsque la lumière ambiante est très faible, on dit que l'œil fonctionne en vision *scotopique* : ce sont les bâtonnets dans la rétine de l'œil qui agissent comme détecteurs de lumière; ils sont très sensibles à la lumière bleue mais ne permettent pas de distinguer les couleurs des objets. lorsqu'une plus grande quantité de lumière entre dans l'œil, les cônes de la rétine commencent alors à s'activer. On compte trois types de cônes, respectivement sensibles à la couleur bleue, verte et rouge, ce qui permet à l'œil de distinguer les couleurs des objets. En situation *photopique*, la lumière ambiante est suffisante pour que les cônes soient bien actifs, et on obtient alors une réponse spectrale plus importante dans la région rouge du spectre lumineux (entre 600 et 700 nm). Si la lumière ambiante est à peine suffisante pour activer les cônes, on parle alors du régime *mésopique*, où la réponse spectrale de l'œil se situe entre les cas photopique et scotopique.

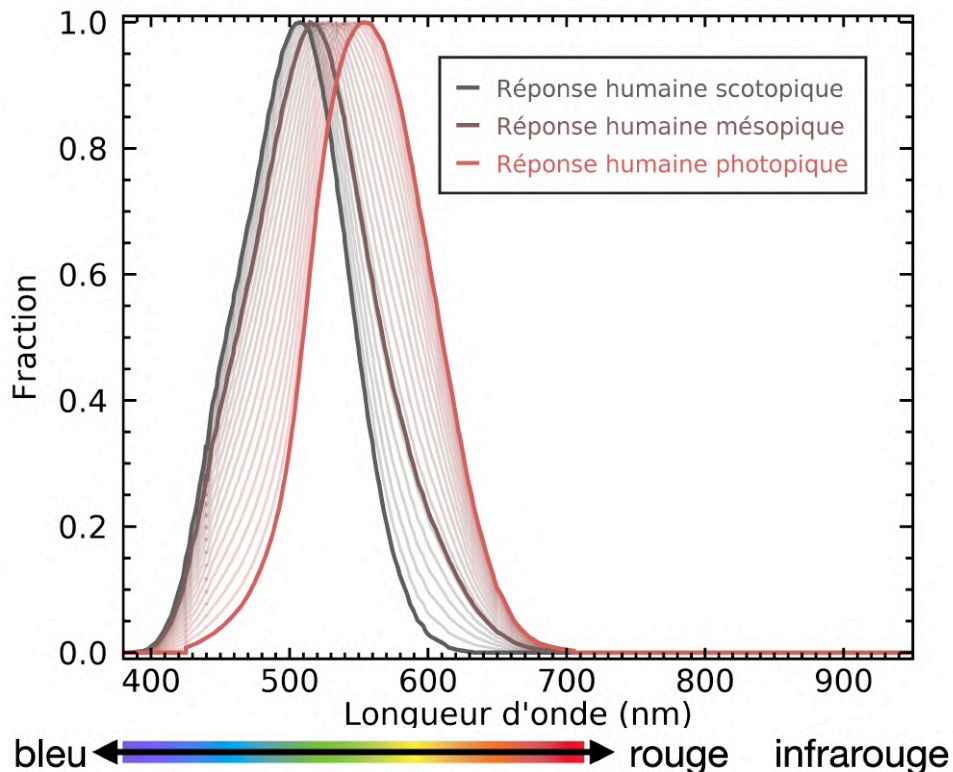
On peut ainsi représenter la réponse spectrale mésopique  $R_{\text{meso}}$  de l'œil humain par une équation simple, en combinant la réponse spectrale scotopique  $R_{\text{sco}}$  des bâtonnets à la réponse spectrale photopique  $R_{\text{phot}}$  des cônes :

$$R_{\text{meso}} = (1 - x)R_{\text{sco}} + xR_{\text{phot}} \quad (5)$$

La quantité  $x$  dans l'équation ci-dessus est une variable libre qui peut prendre une valeur entre zéro (en situation d'obscurité totale) et 1,0 (en plein jour). La dépendance de  $x$  selon la luminance ambiante, en unités physiques de candela par mètre carré, est déterminée de façon empirique. Nous avons utilisé ici la relation établie par le

Lighting Research Center pour traduire les différentes valeurs de  $x$  en descriptions subjectives de luminance ambiante.

Nous utiliserons ici la valeur  $x = 0,28$  comme point de référence d'une luminance ambiante typique qu'on pourrait espérer obtenir dans une ville comme Montréal pour l'observation astronomique. Elle correspond approximativement à la luminosité ambiante en situation de pleine lune, en l'absence d'éclairage artificiel. La figure 11 illustre la réponse mésopique pour différentes valeurs de  $x$  :



**Figure 11.** Réponse spectrale de l'œil humain en fonction de l'éclairage ambiant. En situation d'obscurité totale (**scotopique**, trait noir épais), l'œil humain est plus sensible à l'éclairage bleu. En situation de plein éclairage (**photopique**, trait rouge épais) l'œil humain est surtout sensible aux longueurs d'ondes jaunes et rouges et beaucoup moins sensible au bleu. En situations intermédiaires (traits pâles), la réponse spectrale de l'œil humain est donnée par une combinaison des deux cas extrêmes avec un poids  $x$  qui dépend de l'éclairage ambiant. Le cas intermédiaire qui correspond à  $x = 0,28$  est indiqué par un trait brun plein.

Pour comprendre les effets de la différence entre la réponse spectrale de l'œil humain et celle de VIIRS, il est utile d'examiner la question du spectre lumineux de différents types d'éclairage. Le spectre lumineux correspond à la densité d'énergie lumineuse reçue par unité de surface (aussi appelée « l'intensité »), à chaque longueur d'onde. Dans la figure 12, on compare la réponse spectrale de l'œil humain au spectre de DEL à différentes températures d'éclairage :



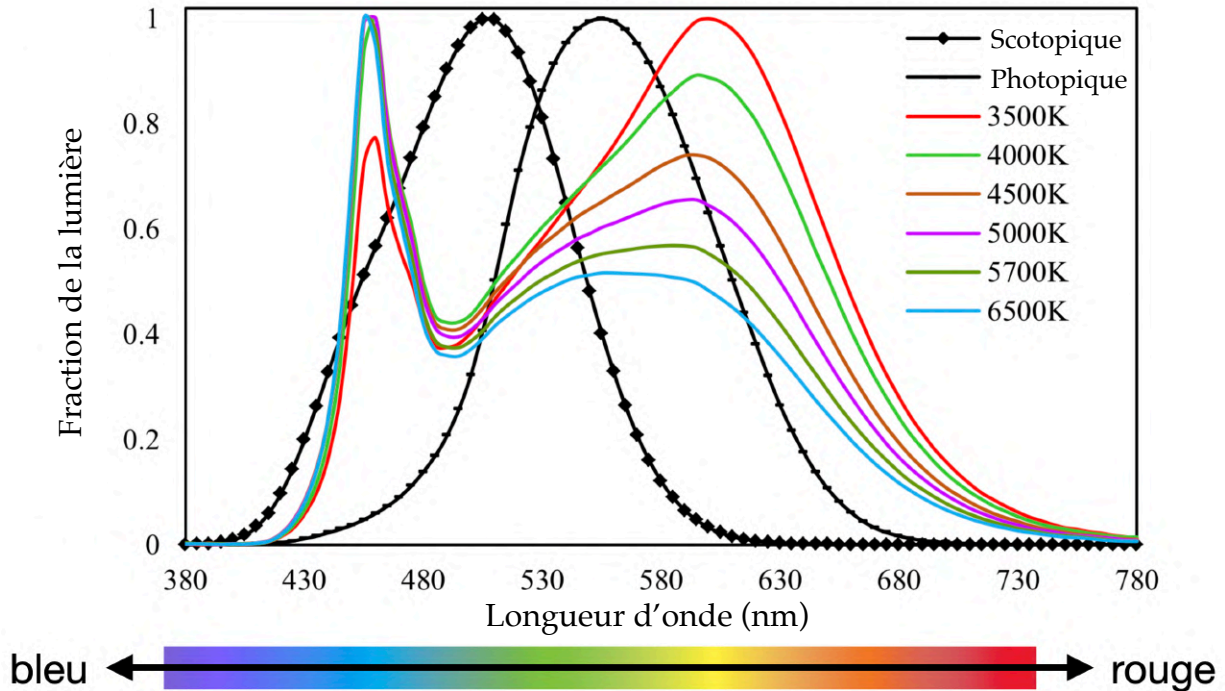
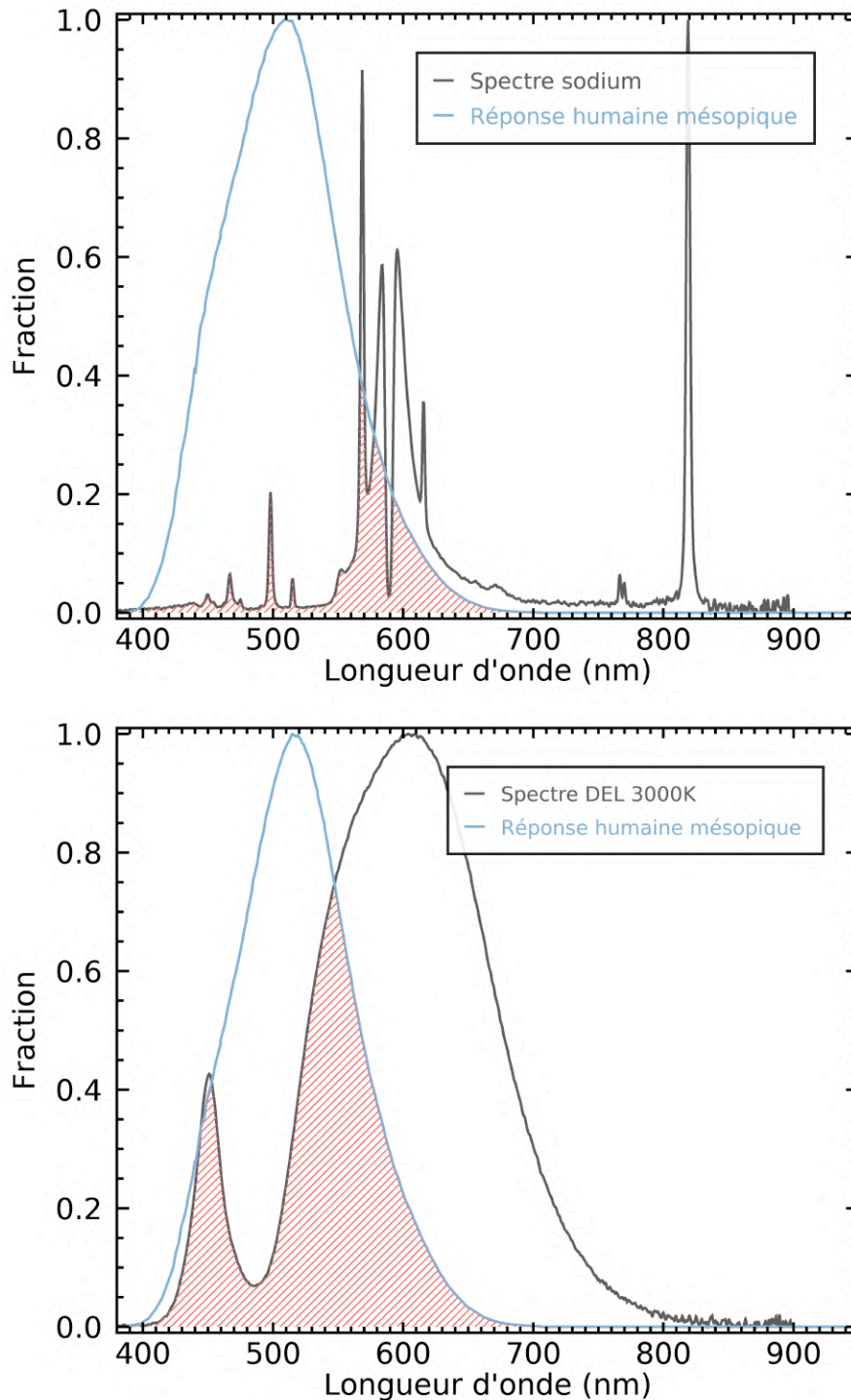


Figure 12. Spectres lumineux des diodes électroluminescentes (DEL) à différentes températures d'éclairage (traits pleins colorés) comparés à la réponse spectrale de l'œil humain en conditions scotopique et photopique. Figure tirée de [Dong et al. \(2017\)](#).

La notion de **température d'éclairage** correspond ici à la couleur de la lumière, déterminée par le spectre lumineux, et non pas à la température physique de l'ampoule. On y voit bien que les DEL dont les températures d'éclairage sont graduellement plus basses émettent une quantité de lumière plus importante dans les régions rouges du spectre lumineux (à droite sur la figure). La technologie d'éclairage aux DEL repose sur le principe d'une diode émettant un pic de lumière étroit autour de 450 nm, c'est-à-dire de couleur bleue. Ainsi, une DEL nue aurait une température d'éclairage très élevée. Pour obtenir une température d'éclairage plus basse, on y ajoute un revêtement phosphorescent de l'épaisseur désirée pour redistribuer une fraction de la lumière aux longueurs d'ondes plus rouges.

On remarque aussi que la forme du spectre lumineux des lampes au sodium (figure 13, page suivante) est complètement différente : elle correspond en fait à une série de pics lumineux très étroits à des couleurs précises, distribués pour l'essentiel entre 550 et 650 nm, à l'exception d'un pic à 820 nm qui n'est pas détectable par l'œil humain.

La plage relativement étroite du spectre lumineux des lampes au sodium rend plus difficile la distinction des couleurs par l'humain ([Boynton & Purl 1989](#)), étant donné qu'elle ne couvre qu'une partie de la réponse spectrale de l'œil. Les éclairages aux DEL présentent potentiellement un avantage à cet égard, car ils fournissent un meilleur

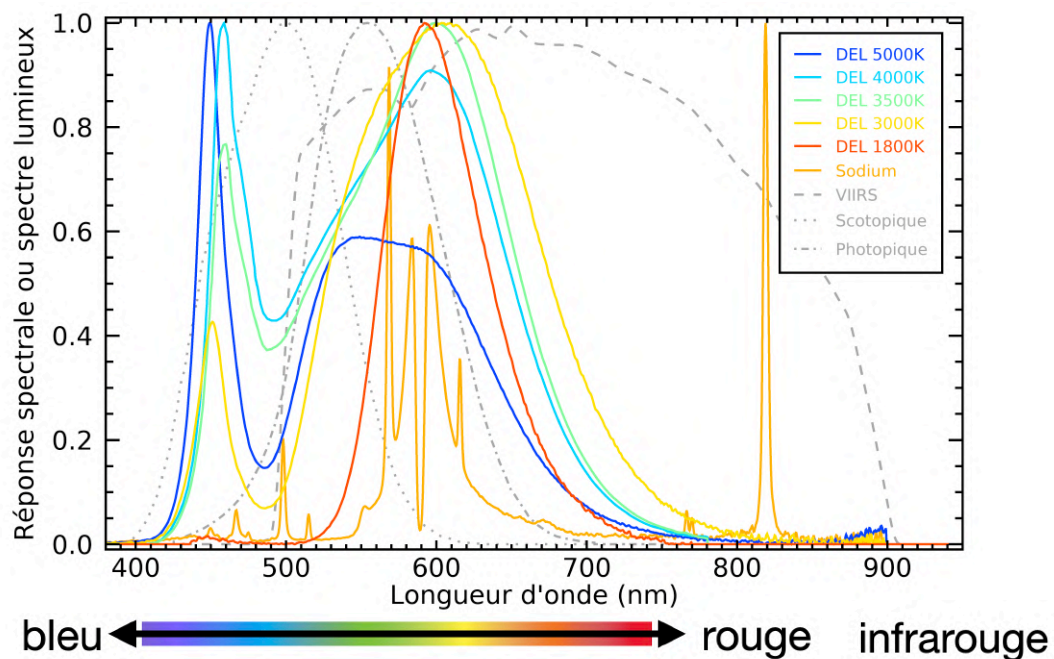


**Figure 13.** Graphique du haut : spectre d'émission lumineuse d'une lampe au sodium (trait noir) comparé à la réponse spectrale de l'œil humain en situation mésopique (trait bleu). Graphique du bas : spectre d'émission d'une DEL à 3000 K (trait noir) comparé à la même réponse spectrale de l'œil humain (trait bleu). Dans les deux graphiques, la zone de recoupement entre l'émission de la source et la réponse de l'œil est indiquée par des hachures rouges; elle représente la gamme de couleurs qui sera perçue par l'œil humain. On constate que l'œil humain discriminera plus facilement les couleurs en présence d'un éclairage DEL à 3000 K qu'avec un éclairage au sodium.

recoupement avec la réponse spectrale de l'œil humain.

Il est important de comparer le spectre lumineux des DEL et des lampes au sodium avec la réponse spectrale de VIIRS et de l'œil humain, car cela nous permettra de déterminer si les changements de pollution lumineuse observés par l'instrument VIIRS peuvent se traduire en un changement similaire pour l'œil humain. Par exemple, on pourrait imaginer un scénario peu souhaitable où tous les luminaires au sodium seraient remplacés par des DEL à température d'éclairage élevée (bleues), mais beaucoup plus lumineuses : les données VIIRS montreraient alors une radiance réduite puisque la majorité de la lumière émise par ces DEL serait trop bleue pour la réponse spectrale de l'instrument, alors que l'œil humain observerait une pollution lumineuse considérablement accrue dans ce scénario.

La figure 14 illustre comment les spectres des DEL à différentes températures se comparent à ceux d'une lampe au sodium et à la réponse spectrale de l'œil humain en situations scotopique et photopique ainsi qu'à celle de l'instrument VIIRS. Nous avons utilisé les données du [Lamp Spectral Power Distribution Database](#) pour dresser cette figure et les calculs qui suivront.



**Figure 14.** Spectres lumineux des DEL à différentes températures d'éclairage (traits pleins colorés) comparés à celui d'une lampe au sodium (trait plein orange) et aux réponses spectrales de l'instrument VIIRS et celles de l'œil humain en conditions scotopique et photopique.

La suite de cette section fait appel à certaines notions mathématiques qui ne seront pas nécessairement familières à tous les lecteurs. Nous recommandons tout de même à tous la lecture de cette section, et d'ignorer les équations mathématiques si elles ne vous sont pas utiles. Nous espérons que les explications qui les accompagnent vous permettront quand même de suivre le raisonnement derrière notre analyse. Les équations détaillées sont incluses par souci de reproductibilité.

Pour les fins du présent rapport technique, nous avons défini une métrique d'efficacité de détection  $S \otimes D$  (sans unité physique) d'une source lumineuse  $S$  par un détecteur  $D$  donné, en prenant la moyenne pondérée d'un spectre  $F_\lambda$  (en Watts par mètre carré par nanomètre), normalisé par l'émittance  $E$  de la source (en Watts par mètre carré)<sup>4</sup>. Les poids de normalisation  $p_\lambda$ , qui sont une fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , sont donnés par la réponse spectrale relative  $R_\lambda$  du détecteur (sans unité physique)<sup>5</sup>. On a ainsi :

$$S \otimes D = \frac{1}{E} \int_0^\infty p_\lambda F_\lambda d\lambda \quad (6)$$

$$E = \int_0^\infty F_\lambda d\lambda \quad (7)$$

$$p_\lambda = \frac{R_\lambda}{\int_0^\infty R_\lambda d\lambda} \quad (8)$$

On peut combiner les équations ci-dessus pour obtenir :

$$S \otimes D = \frac{\int_0^\infty R_\lambda F_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty R_\lambda d\lambda \cdot \int_0^\infty F_\lambda d\lambda} \quad (9)$$

On peut comparer l'efficacité de détection de l'œil humain dans notre situation mésopique de référence ( $x = 0,28$ ) par rapport à celle de VIIRS pour différents types de lampes, en prenant le rapport des efficacités :

$$\frac{S \otimes D_{\text{VIIRS}}}{S \otimes D_{\text{meso}}} \quad (10)$$

<sup>4</sup> Les considérations liées à la normalisation photopique seront abordées et appliquées plus loin.

<sup>5</sup> Pour notre analyse, nous avons utilisé la réponse spectrale de VIIRS-DNB en mode *High Gain Stage* (HGS) correspondant aux observations nocturnes utilisées ici. Après le lancement de *Suomi NPP*, l'équipe scientifique *NASA VIIRS Calibration Support Team* a déterminé que la réponse spectrale de VIIRS s'est dégradée à cause de l'interaction de la lumière ultraviolette avec du tungstène contaminant le revêtement des miroirs de l'instrument. Chris Moeller et Jeffrey McIntire nous ont gracieusement fait parvenir une réponse spectrale mesurée après le lancement de *Suomi NPP* et corrigée selon un modèle de dégradation du tungstène correspondant à des observations centrées sur le 30 juin 2018. Il est à noter que le plus gros du changement dans la réponse spectrale s'est produit en février 2013, et que la dégradation subséquente est très légère au fil des années. Nous avons donc utilisé cette réponse spectrale de juin 2018 pour toute notre analyse.



Nous avons trouvé les rapports d'efficacité suivants pour les différentes technologies d'éclairage :

- Sodium : 109 %
- DEL 2500 K : 93 %
- DEL 3000 K : 88 %
- DEL 4000 K : 52 %
- DEL 5000 K : 44 %

Le ratio de 52 % pour les DEL 4000 K, par exemple, indique que VIIRS est environ moitié moins efficace que l'œil humain pour détecter les DEL à 4000 K, dans les conditions d'éclairage choisies ici. On peut voir que, tel qu'attendu, VIIRS est graduellement moins efficace pour détecter les DEL à température d'éclairage élevée puisqu'elles émettent une plus grande fraction de lumière bleue.

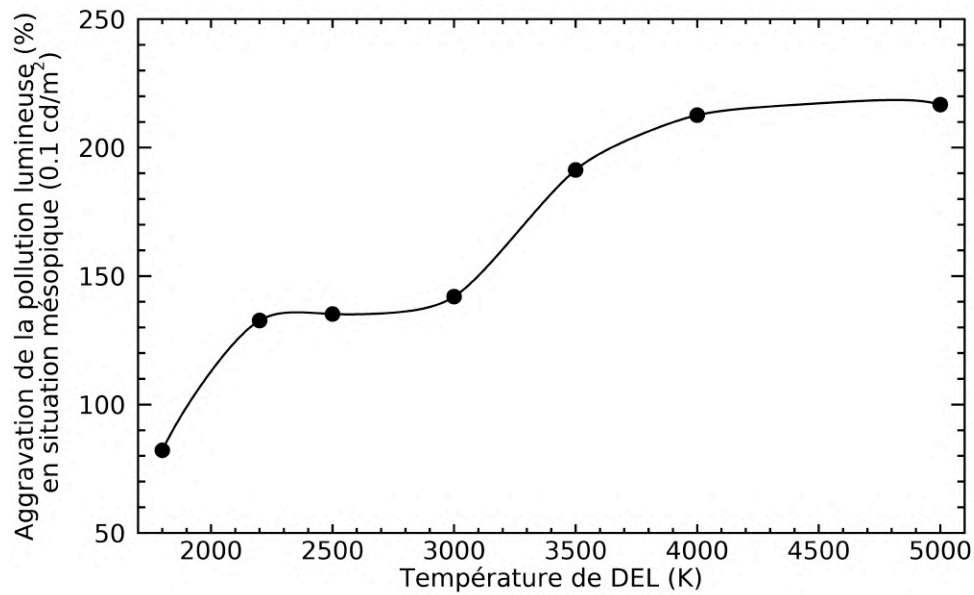
Il est intéressant de comparer le changement qui serait détecté par VIIRS et par l'œil humain en conditions relativement sombres si on effectue la transition de sodium aux DEL en préservant l'illuminance au sol, mesurée en *lux*. Cette quantité est définie par le flux lumineux par unité de surface détecté par l'œil humain en mode photopique, ce qui est pertinent, par exemple, pour la conduite automobile. En combinant la réponse humaine photopique au spectre lumineux de chaque type d'éclairage, qu'on noterait ici  $S \otimes D_{\text{phot}}$  suivant notre convention, on peut déterminer la quantité d'énergie lumineuse totale émise dans chaque cas à illuminance égale, de façon relative à l'énergie lumineuse qui serait émise par des luminaires au sodium (représenté ici par  $S_{\text{Na}}$ ) :

$$\frac{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{phot}}}{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{phot}}} \quad (11)$$

Dans ce scénario où l'illuminance est préservée, et si l'on fait l'hypothèse additionnelle que l'éclairage directionnel reste inchangé, il est intéressant d'évaluer quel serait l'effet de la transition de la technologie d'éclairage sur la pollution lumineuse, telle que perçue par l'œil humain en situation d'éclairage relativement sombre ( $x = 0,28$ ). Ce rapport d'efficacité est donné par l'expression suivante :

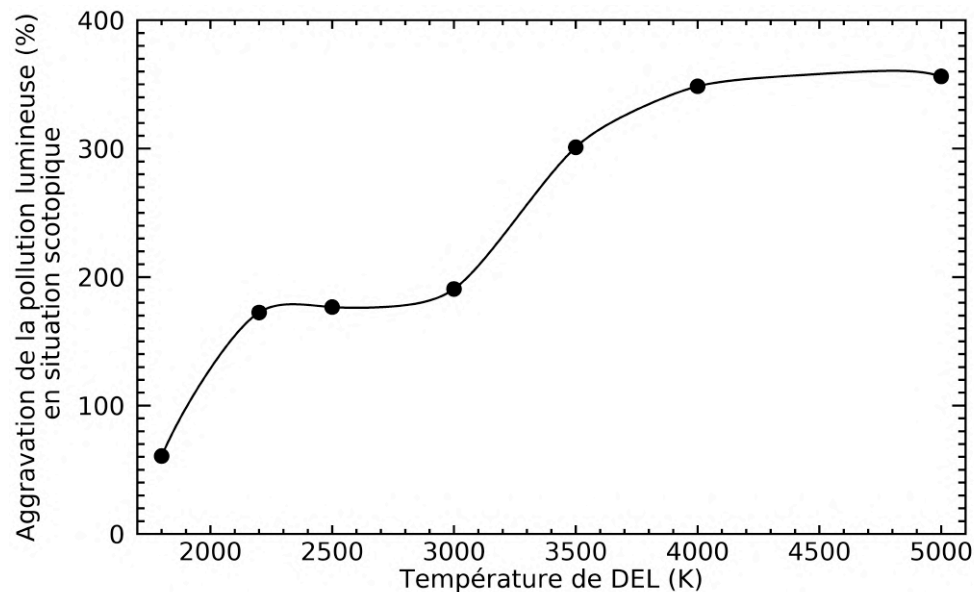
$$\frac{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{meso}}}{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{meso}}} \cdot \frac{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{phot}}}{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{phot}}} \quad (12)$$

Pour calculer ces rapports d'efficacité, nous avons modifié légèrement la réponse spectrale humaine mésopique pour tenir compte des effets de la diffusion atmosphérique en la multipliant par le facteur  $D$  défini à la section 3. La réponse spectrale s'en trouve légèrement décalée vers le bleu étant donné qu'une personne observant le ciel depuis sol détectera surtout la lumière diffusée par l'atmosphère terrestre. Nous n'avons *pas* appliqué une telle modification à la réponse spectrale photopique, qui est utilisée ici pour représenter la réponse enregistrée par un photomètre au sol à proximité d'un luminaire. La figure 15 (page suivante) illustre les résultats obtenus.



**Figure 15.** Aggravation de la pollution lumineuse si la transition des luminaires au sodium à la technologie DEL n'est pas accompagné d'une diminution de l'éclairage sous la norme d'illuminance ou d'autres stratégies telles que l'éclairage directionnel. Cette figure suppose la réponse de l'œil humain en situation mésopique relativement sombre. Des gains significatifs en terme de limitation de la pollution lumineuse sont observés à 3000 K ou moins, ainsi qu'à 1800 K ou moins. Seules les DEL à 1800 K réduisent la pollution lumineuse en situation mésopique sans l'adoption de stratégies complémentaires.

On peut refaire le même exercice en supposant cette fois une situation très obscure, où l'œil humain fonctionne en mode purement scotopique :



**Figure 16.** Aggravation de la pollution lumineuse si la transition des luminaires au sodium aux DEL n'est pas accompagné d'une diminution de l'éclairage sous la norme d'illuminance ou d'autres stratégies telles que l'éclairage directionnel. Cette figure suppose la réponse de l'œil humain en situation scotopique, très sombre.

La figure 16 illustre le pire scénario puisque la situation scotopique maximise la sensibilité de l'œil humain à la partie bleue du spectre, où les DEL émettent nettement plus de lumière que les luminaires au sodium (sauf aux températures DEL sous 1800 K). Cette figure pourrait représenter par exemple l'effet sur la pollution lumineuse dans la couronne d'une ville qui a fait la transition aux DEL sans autres changements. Cependant, cette prévision n'est pas nécessairement réaliste au sein même de cette ville, où il serait d'emblée très difficile de trouver une situation aussi sombre.

Les valeurs montrées aux figures 15 et 16 représentent l'augmentation de la pollution lumineuse qui accompagnerait un simple passage du sodium aux DEL, en conservant la même norme d'illuminance au sol et sans tirer profit de la flexibilité des DEL pour l'éclairage directionnel, par exemple.

On y voit immédiatement que la transition à l'éclairage DEL sera nettement néfaste, voire catastrophique, pour la pollution lumineuse si elle n'est pas combinée avec un éclairage directionnel ou une diminution de l'illuminance au sol. Ceci est particulièrement vrai pour les DEL à température d'éclairage élevée : dans notre situation mésopique de référence, la pollution lumineuse augmenterait d'environ 2,2 fois si on adoptait par exemple les DEL à 5000 K sans autre changement, ou même de 3,5 fois en situation très sombre. On peut expliquer ces constatations par le fait que les luminaires au sodium émettent une grande fraction de leur lumière hors du régime scotopique (nocturne) de l'œil humain. Ainsi, la transition aux DEL présente le risque de contribuer grandement à la pollution lumineuse si on ne tire pas avantage de la plus grande flexibilité de cette technologie.

On note aussi que dans les deux cas (mésopique de référence et scotopique), le plus grand effet se produit pour les DEL aux températures d'éclairage entre 3000 K et 3500 K. **On voit déjà qu'avant d'opter pour les DEL aux températures d'éclairage plus élevées que 3000 K, il sera essentiel de bien considérer l'impact qu'aurait ce choix sur la pollution lumineuse.**

La prochaine question qui nous intéresse sera de développer un facteur de correction pour transformer les changements de radiance observés depuis l'espace par la caméra VIIRS en changements de radiance diffusée par l'atmosphère terrestre et détectables par l'œil humain dans différentes conditions d'éclairage. Plusieurs hypothèses simplificatrices seront requises pour faire cette correction : on devra par exemple ignorer les effets de la lumière émise près de l'horizon et comment celle-ci pourrait être modifiée par la transition aux DEL. Une modélisation détaillée de l'environnement au sol serait nécessaire pour inclure ces considérations dans nos calculs, mais une telle analyse est hors de portée du présent rapport technique (voir p.ex. [Kinzey et al. 2017](#)).

Nous devons aussi faire l'hypothèse que tous les changements détectés par la caméra VIIRS sont causés seulement par les conversions de luminaires effectuées par la Ville de Montréal. C'est une approximation relativement grossière, mais nous expliquons à la section 6 comment nous avons sélectionné les secteurs de l'île de Montréal

où la majorité de la lumière est émise par les luminaires appartenant à la Ville, ce qui rend l'approximation plus réaliste. On pourra ainsi corriger les changements de radiance détectés par VIIRS et les interpréter comme une amélioration ou une aggravation de la pollution lumineuse résultant du changement des luminaires. L'effet que nous observerons sera bien sûr une combinaison des changements de technologie (sodium versus DEL), des changements dus à l'éclairage directionnel, et des changements apportés à l'illuminance au sol.

On peut décomposer la radiance  $f_V$  mesurée par l'instrument VIIRS en fonction de la contribution des luminaires au sodium  $\phi_{Na}$  à cette radiance. Pour ce faire, nous faisons appel au spectre lumineux  $F_{Na}$  des luminaires au sodium et à la réponse spectrale  $R_V$  de VIIRS, ces deux dernières quantités étant des fonctions de la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$f_V = \int_0^{\infty} \phi_{Na} F_{Na}(\lambda) R_V(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

Dans l'application de l'équation ci-haut, nous aurons légèrement modifié la réponse spectrale de VIIRS pour prendre en compte la diffusion atmosphérique décrite à la section 3, ce qui réduit légèrement l'efficacité de VIIRS à détecter la lumière bleue, puisqu'une partie de celle-ci est diffusée par l'atmosphère terrestre hors de sa ligne de visée<sup>6</sup>.

En remarquant que  $\phi_{Na}$  est une quantité indépendante de la longueur d'onde, on peut redéfinir  $f_V$  selon les termes d'efficacité définis plus haut :

$$f_V = \phi_{Na} S_{Na} \otimes D_{VIIRS} \quad (14)$$

Dans l'équation ci-dessus,  $S_{Na} \otimes D_{VIIRS}$  représente donc l'efficacité de détection des luminaires au sodium par l'instrument VIIRS. Si on fait la supposition qu'une fraction  $\beta$  (une fraction entre zéro et 1) des luminaires ont été changés pour adopter la technologie des DEL, on peut déduire que la radiance détectée par VIIRS suivra alors l'équation suivante :

$$f'_V = (1 - \beta) \phi_{Na} S_{Na} \otimes D_{VIIRS} + \beta \phi_{DEL} S_{DEL} \otimes D_{VIIRS} \quad (15)$$

Le premier terme de cette équation représente la contribution des luminaires au sodium restants au signal détecté par VIIRS, et le deuxième terme représente la nouvelle contribution des luminaires DEL qui ont été ajoutées. Plus spécifiquement, on a ici introduit un nouveau terme  $\phi_{DEL}$  qui représente la contribution des DEL à la radiance vers

---

<sup>6</sup> Pour ce faire, nous multiplierons la réponse spectrale  $R_V$  par le facteur  $T$  défini à la section 3.



le zénith<sup>7</sup>, ainsi qu'un terme  $S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{VIIRS}}$  qui représente l'efficacité de détection des DEL par l'instrument VIIRS.

On peut relier les quantités  $\phi_{\text{Na}}$  et  $\phi_{\text{DEL}}$  en faisant appel à la façon dont le niveau d'illuminance au sol a été modifié durant la transition aux DEL. On utilisera ici le symbole  $\ell$  pour représenter ce changement fractionnel, où  $\ell = 1$  représenterait l'adoption de la même norme d'illuminance au sol suivie lors de l'installation des luminaires au sodium, et  $\ell = 0,7$  représenterait par exemple une décision de diminuer l'illuminance de 30 %. Nous devons aussi représenter les autres changements dûs, par exemple, à l'éclairage directionnel, à l'aide d'un autre symbole  $\delta$ . Étant donné que l'illuminance est définie selon la réponse photopique de l'œil humain, il en découle la relation suivante :

$$\phi_{\text{DEL}} S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{phot}} = \ell \delta \cdot \phi_{\text{Na}} S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{phot}} \quad (16)$$

Encore une fois,  $D_{\text{phot}}$  ci-dessus n'a pas été corrigé pour la diffusion atmosphérique, car c'est une mesure qui est effectuée directement sous les luminaires. On peut utiliser cette dernière relation pour remplacer  $\phi_{\text{DEL}}$  dans l'équation pour  $f'_V$  et obtenir :

$$f'_V = \phi_{\text{Na}} \left[ (1 - \beta) S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{VIIRS}} + \beta (S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{VIIRS}}) \ell \delta \left( \frac{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{phot}}}{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{phot}}} \right) \right] \quad (17)$$

On peut ensuite définir un changement fractionnel  $\Delta_V$  du signal lumineux déterminé par VIIRS suivant la transition aux DEL, correspondant à la quantité que l'on mesurera directement à partir des données VIIRS :

$$\Delta_V = \frac{f'_V - f_V}{f_V} \quad (18)$$

On peut alors exprimer ce changement fractionnel du signal lumineux en fonction des termes d'efficacité précédents — ceci nous permettra d'éliminer la variable inconnue  $\phi_{\text{Na}}$  pour obtenir :

$$\Delta_V = \beta \left[ \ell \delta \left( \frac{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{phot}}}{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{phot}}} \right) \left( \frac{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{VIIRS}}}{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{VIIRS}}} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

Rappelons ici que le but de cet exercice est de traduire ce changement relatif en radiance  $\Delta_V$  observée par VIIRS en changement relatif de radiance détectable par l'œil humain et se trouvant diffusée par l'atmosphère terrestre hors de la ligne de visée de

<sup>7</sup> La contribution de la radiance dirigée vers le haut émise directement par un luminaire ou réfléchi par le sol

l'instrument VIIRS. Si on sélectionne la radiance détectable par l'œil humain en situation mésopique, par exemple, un tel changement serait défini comme :

$$\Delta_{\text{meso}} = \frac{f'_{\text{meso}} - f_{\text{meso}}}{f_{\text{meso}}} \quad (20)$$

où les termes  $f_{\text{meso}}$  et  $f'_{\text{meso}}$  représentent la radiance lumineuse détectable par l'œil humain et diffusée par l'atmosphère terrestre avant et après la transition aux DEL, respectivement. Par analogie directe avec les équations précédentes pour VIIRS, en remplaçant simplement la réponse spectrale de VIIRS par celle de l'œil humain (cette dernière, qu'on nomme ici  $D_{\text{meso}}$ , est corrigée pour la diffusion atmosphérique avec le facteur  $D$  de la section 3, comme décrit plus haut), on obtient :

$$f_{\text{meso}} = \phi_{\text{Na}} S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{meso}} \quad (21)$$

$$f'_{\text{meso}} = (1 - \beta) \phi_{\text{Na}} S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{meso}} + \beta \phi_{\text{DEL}} S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{meso}} \quad (22)$$

Une démarche analogue nous permet de décrire ce changement observé par l'œil humain en fonction des différents termes d'efficacité de détection :

$$\Delta_{\text{meso}} = \beta \left[ \ell \delta \left( \frac{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{phot}}}{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{phot}}} \right) \left( \frac{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{meso}}}{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{meso}}} \right) - 1 \right] \quad (23)$$

Les lecteurs plus avertis remarqueront ici que pour traduire le changement observé de VIIRS ( $\Delta_V$ ) vers l'œil humain ( $\Delta_{\text{meso}}$ ), nous devons faire une supposition quant à la valeur de  $\beta$  (la fraction complétée de la transition aux DEL) ou du produit des paramètres  $\ell$  (l'illuminance au sol adoptée) et  $\delta$  (les autres changements tels que l'éclairage directionnel). Or, nous verrons à la prochaine section qu'il est possible de faire une estimation éclairée de la fraction complétée de la transition aux DEL puisque le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal nous a communiqué ces informations; ceci nous permettra d'isoler le produit  $\ell\delta$  dans les équations respectives pour  $\Delta_V$  et  $\Delta_{\text{meso}}$  afin de déterminer un facteur de correction. On trouve :

$$\ell \delta = \left[ \frac{\Delta_V}{\beta} + 1 \right] \left( \frac{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{phot}}}{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{phot}}} \right) \left( \frac{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{VIIRS}}}{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{VIIRS}}} \right) \quad (24)$$

qu'on peut insérer dans l'équation précédente pour  $\Delta_{\text{meso}}$  et simplifier :

$$\Delta_{\text{meso}} = \beta \left[ \left( \frac{\Delta_V}{\beta} + 1 \right) \left( \frac{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{VIIRS}}}{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{VIIRS}}} \right) \left( \frac{S_{\text{DEL}} \otimes D_{\text{meso}}}{S_{\text{Na}} \otimes D_{\text{meso}}} \right) - 1 \right] \quad (25)$$

C'est cette dernière équation qui nous permettra de transformer directement les mesures de la caméra VIIRS en prévision de l'impact sur le dôme de pollution lumineuse détectable par l'œil humain. Ces prévisions pourront facilement être ajustées pour d'autres conditions d'éclairage en adaptant la réponse de l'œil, comprise dans les termes  $S_{Na} \otimes D_{meso}$  et  $S_{DEL} \otimes D_{meso}$ .

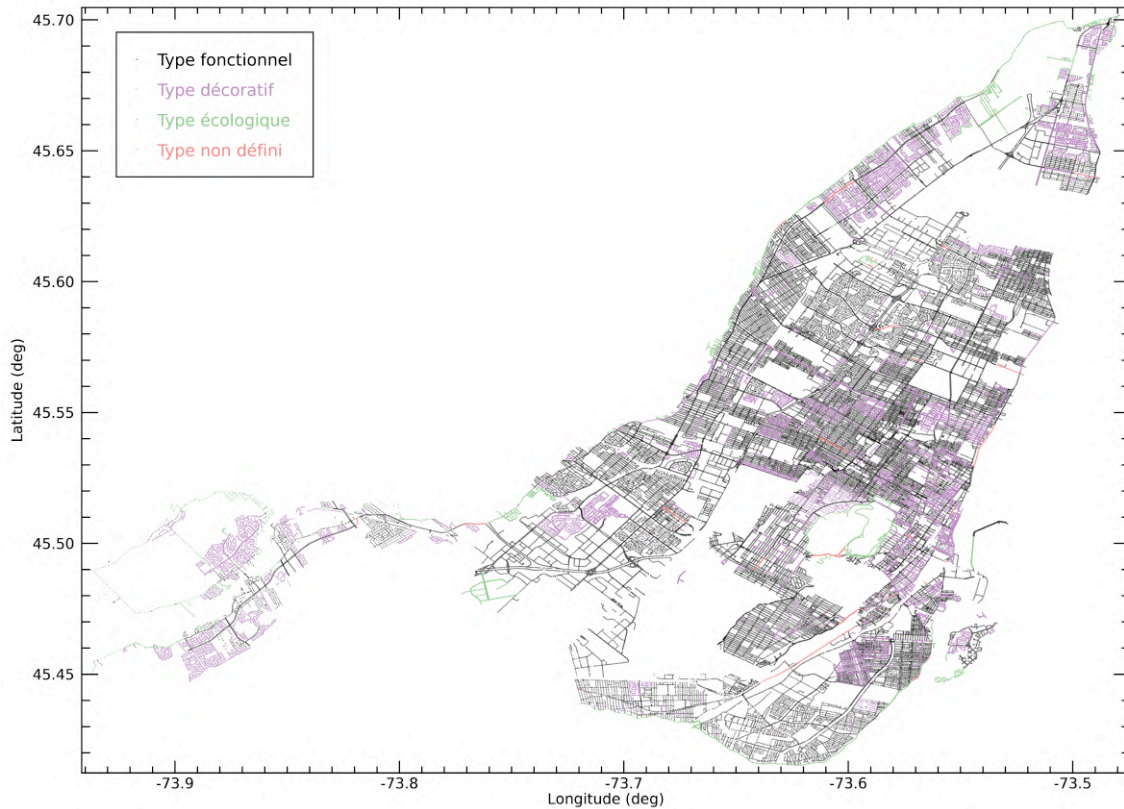
## 5. Mise à jour des luminaires à Montréal



**Figure 17.** Carte des luminaires maintenus par la Ville de Montréal, tels que compilés dans la base de données du Service de l'urbanisme et de la mobilité. Chaque luminaire est représenté ici par un point noir. Les positions des luminaires font ressortir les artères principales de la Ville. On peut remarquer que les régions contrôlées par d'autres municipalités (telles que Ville de Mont-Royal), les parcs, parcs industriels et les autoroutes ne sont pas représentés ici.

Afin d'alimenter les calculs présentés dans ce rapport, le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal nous a fait parvenir une base de données géoréférencée de tous les luminaires sous contrôle de la Ville. En plus du type de luminaire et de monture, cette base de données inclut également la date de changement pour les luminaires qui ont été mis à jour avec la technologie DEL.

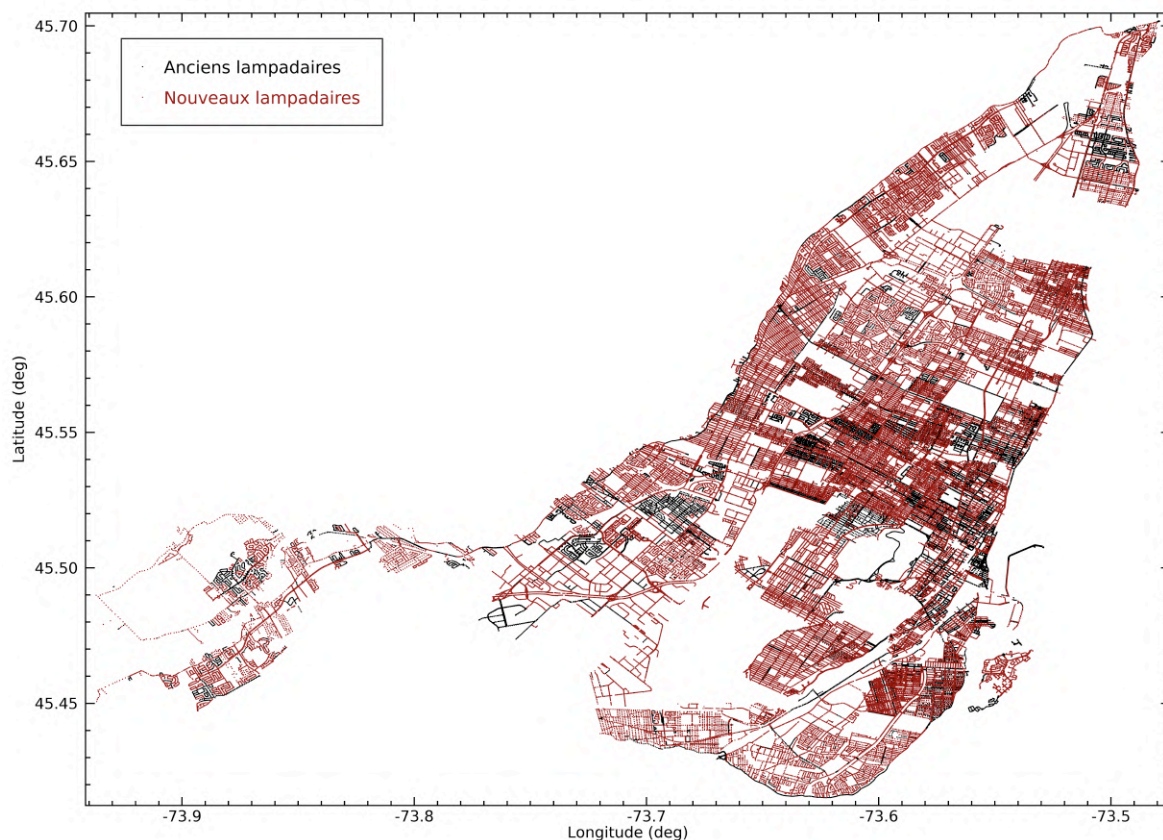
La carte de la figure 17, ci-dessus, montre l'emplacement géographique de tous ces luminaires, où chacun est représenté par un point noir. Les régions plus denses donnent ainsi lieu à des traits plus foncés. On y devine une partie de la forme de l'île de Montréal, ainsi que la structure générale des rues et des quartiers résidentiels. On y remarque aussi plusieurs zones où les données sont absentes. Ces zones ne sont pas nécessairement sans luminaires, mais ceux-ci ne sont pas contrôlés par la Ville de Montréal. Il s'agit notamment d'autres municipalités défusionnées, des grandes infrastructures (aéroport, port, gares de triage), des sites industriels ou commerciaux privés, ou encore des grands parcs urbains.



**Figure 18.** Carte des luminaires maintenus par la Ville de Montréal, tels que compilés dans la base de données du Service de l'urbanisme et de la mobilité. On distingue ici les différents types de luminaires : ceux de type fonctionnel (sodium ou DEL 3000 K) y sont indiqués en noir et sont utilisés le long des artères passantes. Les luminaires décoratifs (sodium ou DEL 3000 K), d'une hauteur moins importante, sont indiqués en violet et sont généralement utilisées dans des rues résidentielles moins achalandées, ou dans les parcs. Les luminaires de type écologique sont distribués le long des grands parcs et du fleuve, et utilisent une température d'éclairage de 2200 K pour réduire leur impact sur la faune.

La mise à jour des luminaires montréalais à la technologie DEL s'est amorcée à l'automne 2017, mais c'est au cours des années 2018 et 2019 que le plus gros des changements ont été effectués. En effet, selon les données qui nous ont été fournies par le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal, seulement 2,6 % des luminaires ont été mis à jour en 2017, alors que le seuil des 50 % a été franchi au cours de l'été 2019. Les données que nous étudierons dans ce rapport (présentées à la prochaine section) ont été échantillonnées au moment où la transition à la technologie DEL était complétée à 52 %. Les données les plus récentes incluses dans notre analyse, en date du 15 juin 2020, indiquent que la transition aux DEL était alors complétée à 68 %.

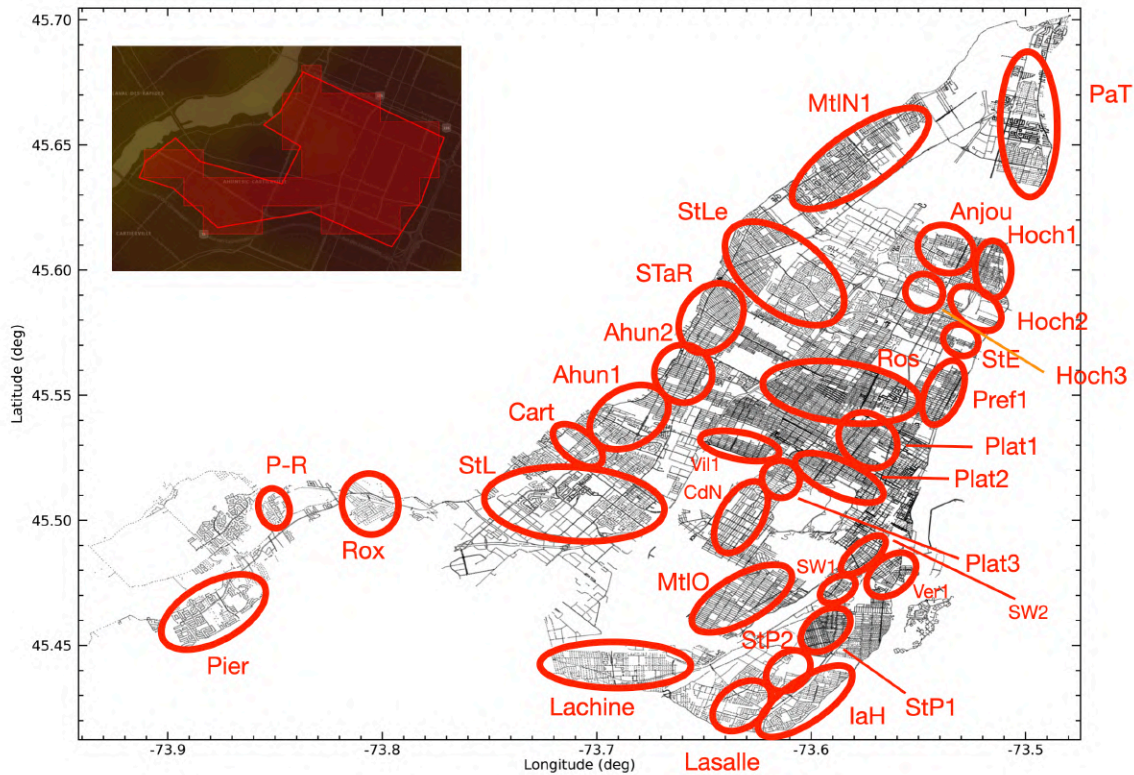
La carte de la figure 19, ci-dessous, montre la distribution des luminaires utilisant la technologie DEL versus ceux au sodium qui n'ont pas encore été mis à jour, en date de juin 2020 :



**Figure 19.** Carte des luminaires entretenus par la Ville de Montréal, en date de juin 2020. Les anciens luminaires au sodium sont indiqués en noir, et ceux ayant été mis à jour avec la technologie DEL sont indiqués en rouge. Dans cette carte, 68 % de tous les luminaires catalogués dans la base de données du Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal ont été mis à jour avec la technologie DEL.



## 6. Résultats

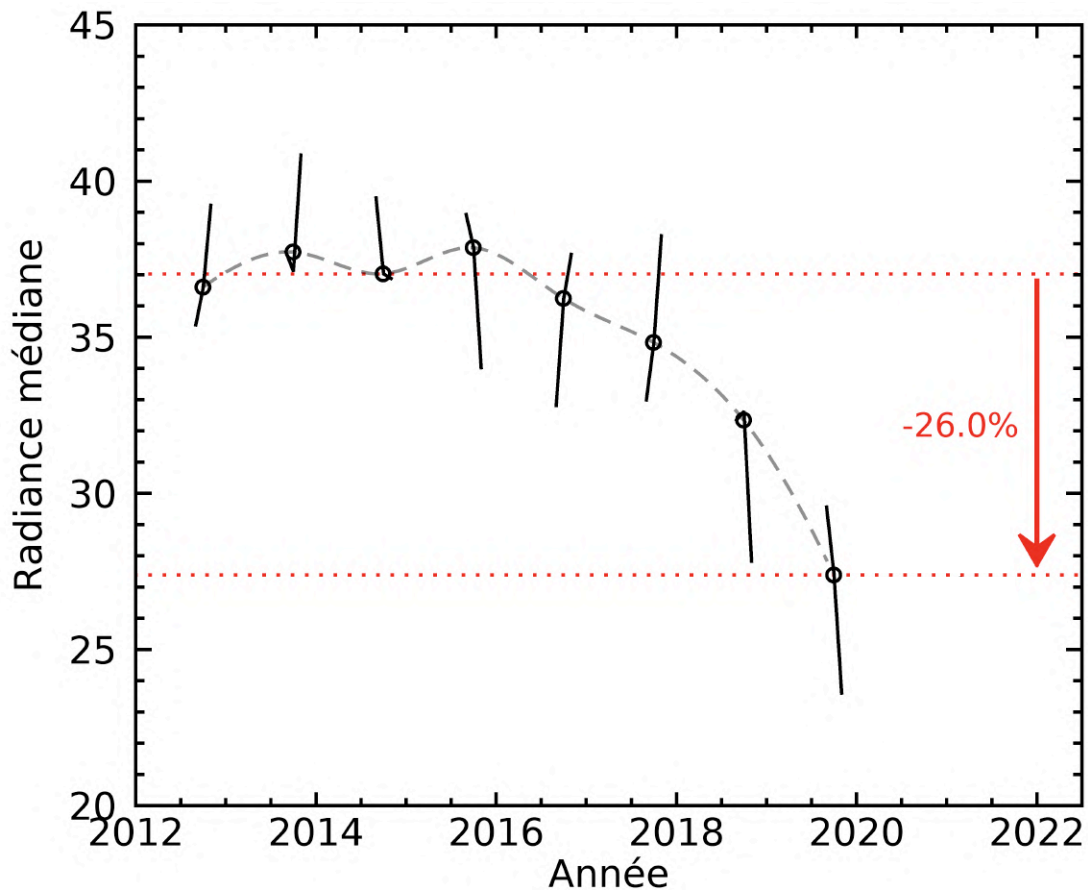


**Figure 20.** Positions approximatives des 32 régions que nous avons sélectionné pour mesurer l'effet de la transition à la technologie DEL à Montréal. La figure en mortaise montre le polygone sélectionné sur le site web Radiance Light Trends pour l'une de ces régions dans Ahuntsic. On y a grossièrement sélectionné (trait rouge plein) les régions où les luminaires sont contrôlés surtout par le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal, et évitant autant que possible les autoroutes et les parcs. La surface rouge pâle indique la sélection des pixels VIIRS faite automatiquement par Radiance Light Trends selon le polygone que nous avons spécifié.

En suivant la procédure décrite à la section 2 « Collecte des données », nous avons extrait du site web de Radiance Light Trends les données historiques de pollution lumineuse pour un ensemble de 32 polygones délimités sur l'île de Montréal. Ces 32 régions, illustrées grossièrement à la figure 20, ont été choisies là où une grande fraction de luminaires avaient été changés par la Ville de Montréal avant 2019, nous permettant ainsi de mesurer les effets occasionnés par ces changements. Nous avons évité autant que possible les autoroutes, les parcs industriels, les municipalités défusionnées et les grands parcs contenant peu d'entrées de luminaires dans la base de données de la Ville.

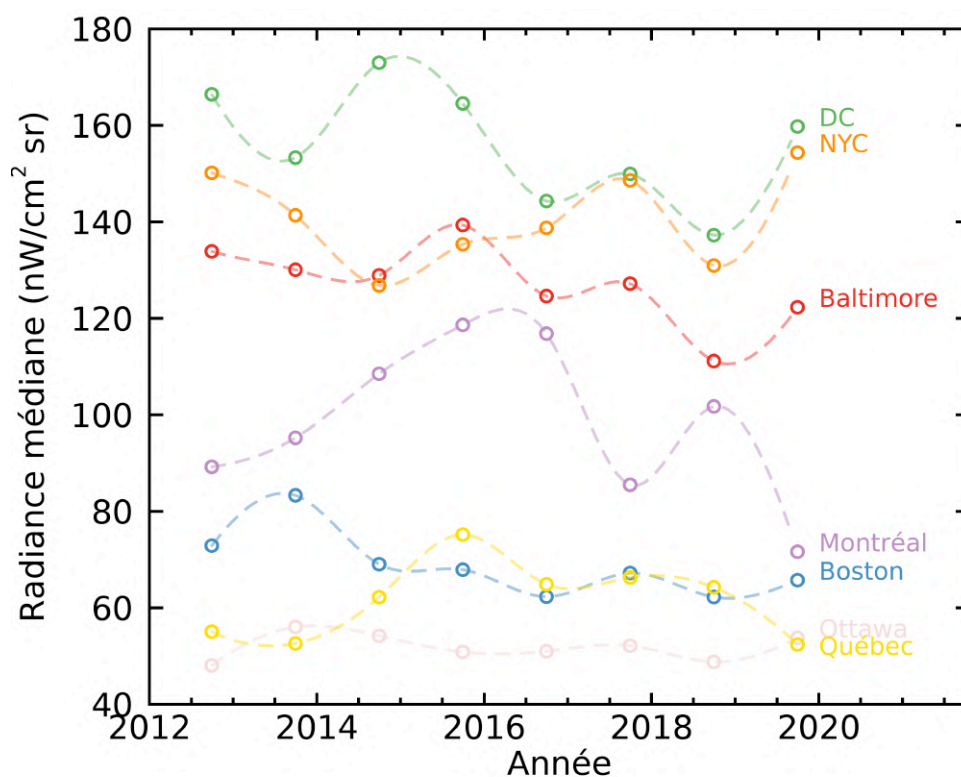
Pour chacune de ces régions, nous avons donc lu séparément l'ensemble des données provenant de Radiance Light Trends et pris la médiane par été des *valeurs moyennes corrigées par unité de surface* (*mean\_area\_weighted*, tel que décrit à la section 2).

Comme mentionné précédemment, seule la médiane historique de chacun des étés est préservée afin d'éviter les effets saisonniers. La figure 21 montre comment cette valeur a évolué avec le temps au sein des zones contrôlées par la Ville de Montréal :



**Figure 21.** Radiance médiane détectée par VIIRS dans l'ensemble des régions de la Ville de Montréal où une quantité significative de luminaires ont été mis à jour avec la technologie DEL avant 2019. Les traits pleins montrent les valeurs mesurées durant chaque été (3 points par été), et les cercles entourent le point médian pour chaque été. On remarque une tendance significativement à la baisse; la radiance moyenne détectée en 2020 était effectivement environ 26 % plus basse que celle avant 2017, qui était elle-même plutôt stable avant la transition aux DEL.

Afin de mettre ces observations en contexte, nous avons fait un exercice similaire en sélectionnant seulement les centre-villes de plusieurs grandes villes à travers l'Amérique du Nord, incluant Montréal. La figure 22 illustre les résultats obtenus :



**Figure 22.** Radiance médiane estivale détectée par VIIRS dans les centre-villes de plusieurs agglomérations urbaines comparables à Montréal à travers l'Amérique du Nord. Chaque cercle représente la valeur médiane des mois d'été afin d'éviter les fluctuations saisonnières, et les traits pointillés représentent des splines à travers les médianes respectives afin de faire ressortir les changements à long terme. Dans la plupart des villes, on n'observe pas d'amélioration claire dans la tendance à long terme, avec l'exception du centre-ville de Montréal, où l'amélioration n'est toutefois pas aussi nette que lorsqu'on observe l'ensemble des régions contrôlées par le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal.

Comme on peut le constater à la figure 22, on n'observe pas d'amélioration nette dans l'ensemble des centre-villes choisis à travers l'Amérique du Nord. On observe une légère amélioration mais aussi de fortes fluctuations pour le centre-ville de Montréal : cela pourrait être dû à une combinaison de la transition aux DEL et de changements dans l'éclairage commercial.

Afin de valider nos résultats, nous avons aussi étudié les données VIIRS à deux endroits près de l'île de Montréal, sur le fleuve Saint-Laurent. Le but est d'extraire les données à des endroits qui sont géographiquement rapprochés de Montréal, mais où on ne s'attend pas à observer de fluctuation dans la radiance médiane mesurée par VIIRS. Les figures 23 et 24 (page suivante) montrent les régions sélectionnées (identifiées « Bassin La Prairie » et « Lac St-Louis »), ainsi que les courbes de radiance résultantes.

Il nous apparaît donc que la tendance à la baisse de la radiance observée dans les secteurs contrôlés par la Ville de Montréal n'est probablement pas due à un effet systématique dans les données VIIRS, autour de l'île de Montréal ou globalement, ni à un problème dans notre traitement des données.

En supposant que la diminution relative en radiance (-26,0 %) a été causée en totalité par le changement de technologie aux DEL et si l'on néglige la contribution de l'éclairage commercial ou privé, on peut utiliser les équations dérivées à la section 4 « Réponse spectrale » pour transformer cette mesure, valide pour l'instrument VIIRS, en prédiction de l'impact sur la radiance émise vers le zénith.

En effectuant ce calcul, on obtient  $\ell\delta = 0,50$ , qui correspondrait à une diminution de moitié de la radiance émise vers le ciel en 2020 détectable par l'œil humain en mode photopique, par rapport à la moyenne avant 2017.

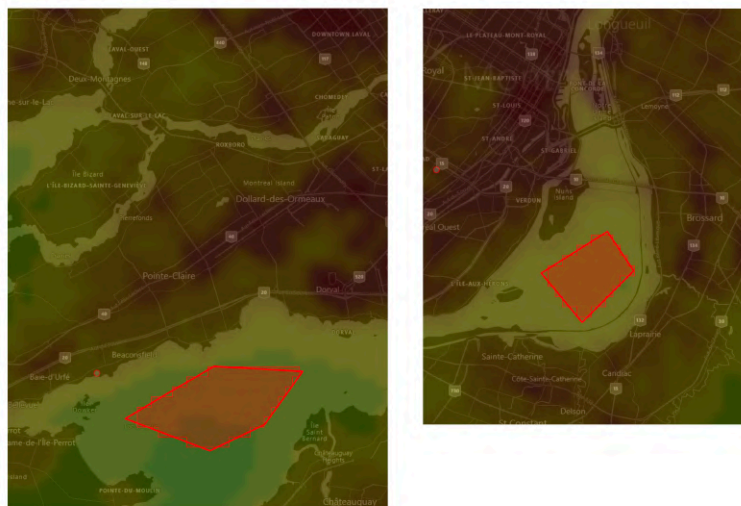
On peut cependant s'attendre à ce que cette diminution soit causée par plusieurs facteurs confondus : par exemple, l'éclairage directionnel adopté par la Ville de Montréal est probablement responsable en partie de cette diminution. Cependant, **le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal a aussi choisi d'utiliser un niveau d'illuminance au sol 30 % sous la norme IES RP-8-14<sup>8</sup>**. Ce choix a été basé sur le fait que la perception des couleurs est améliorée avec un éclairage DEL, tel que décrit à la section 4, ce qui requiert une illuminance au sol moins élevée pour obtenir une visibilité similaire. En plus de cette diminution dans l'illuminance adoptée, les luminaires de technologie DEL offrent un contrôle de l'intensité lumineuse en temps réel, ce qui permet à la Ville de compenser les pertes en illuminance causées par la dégradation graduelle des installations. En effet, on ajustait initialement l'illuminance au sol des luminaires au sodium à 40 % au-dessus de la norme d'éclairage RP-8-14, afin d'éviter que les luminaires n'éclairent éventuellement sous la norme à mesure qu'ils se dégradent.

Il nous est impossible d'estimer précisément quelle fraction de cette diminution en radiance mesurée est due spécifiquement à l'éclairage directionnel, car nous n'avons pas de mesure précise pour nous renseigner sur la dégradation moyenne des luminaires au sodium au moment de leur remplacement. En supposant de manière conservatrice que ceux-ci éclairaient encore 40 % au-dessus de la norme RP-8-14, le bénéfice dû à l'éclairage directionnel serait négligeable. Il serait cependant plus réaliste de faire la supposition que les luminaires au sodium étaient en moyenne près de leur fin de vie et éclairaient ainsi selon la norme au moment où ils ont été remplacés; dans ce cas, nos mesures seraient cohérentes avec une diminution de radiance de 30 % due entièrement à l'éclairage directionnel.

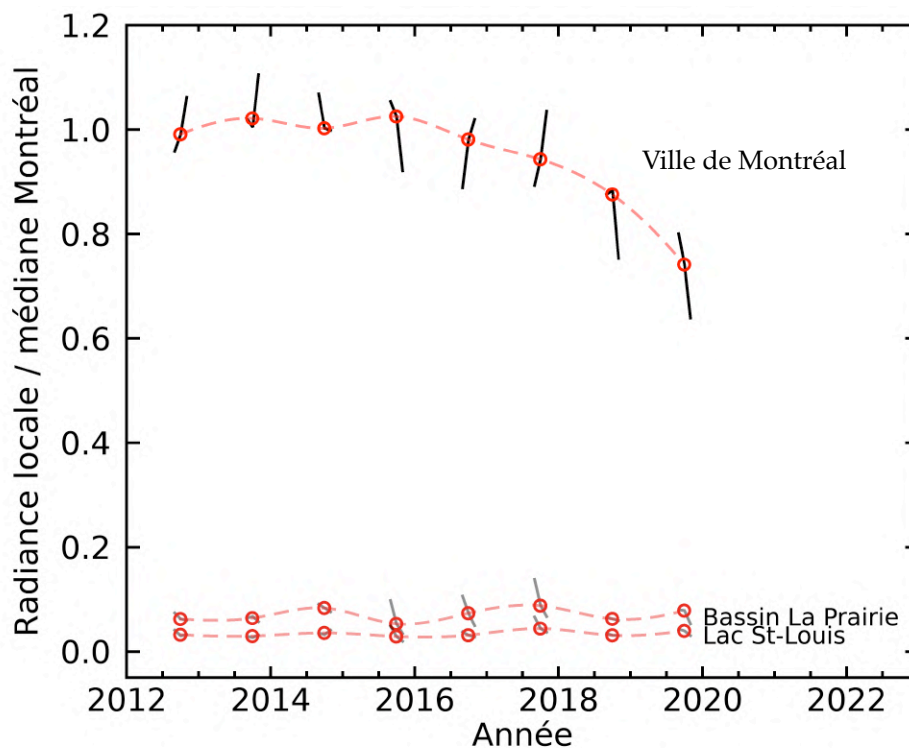
Dans un contexte d'observations astronomiques, il est plus intéressant de se pencher sur la réduction de la pollution lumineuse perçue par l'œil humain en régime

---

<sup>8</sup> Voir [https://santemontreal.qc.ca/fileadmin/fichiers/professionnels/DRSP/sujets-a-z/Eclairage\\_de\\_rue\\_DEL/978-2-550-77376-4.pdf](https://santemontreal.qc.ca/fileadmin/fichiers/professionnels/DRSP/sujets-a-z/Eclairage_de_rue_DEL/978-2-550-77376-4.pdf). Nous omettrons « IES » dans le reste de ce rapport pour alléger.



**Figure 23.** Nous avons sélectionné deux régions géographiquement rapprochées de l'île de Montréal le long du fleuve Saint-Laurent, où on ne s'attend à aucune fluctuation significative en radiance, pour valider nos résultats. La région de gauche correspond grossièrement au lac Saint-Louis, et celle de droite au bassin de La Prairie.

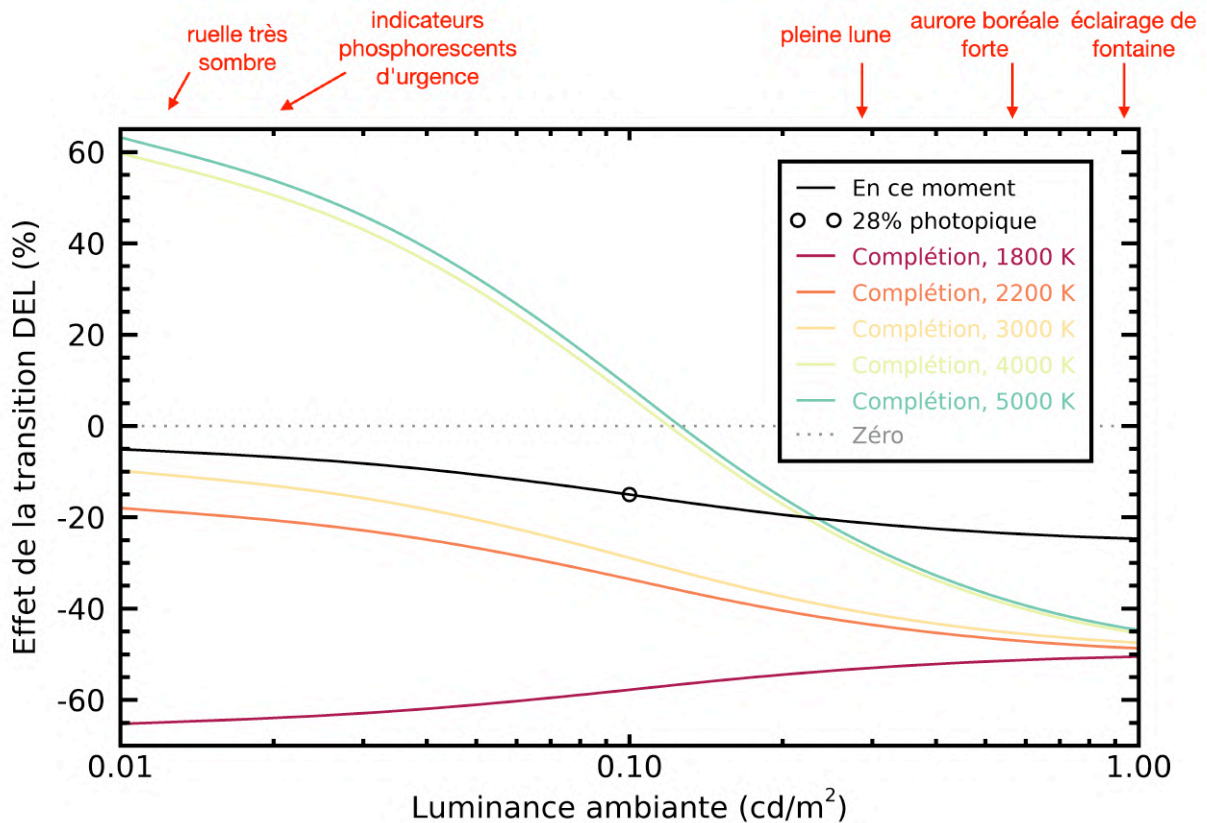


**Figure 24.** Tendence à long terme de la radiance médiane détectée en été par VIIRS dans l'ensemble des régions contrôlées par la Ville de Montréal, en comparaison avec les deux régions sélectionnées le long du fleuve Saint-Laurent près de l'île de Montréal. On n'observe effectivement aucune variation significative dans la radiance médiane détectée à long terme le long du fleuve, ce qui signifie que la diminution observée sur l'île de Montréal n'est probablement pas due à un problème dans les données ni dans notre traitement de celles-ci.



d'éclairage très sombre (vision scotopique) ou relativement sombre (vision mésopique). Dans ces situations, on s'attend à une diminution de radiance contribuant au dôme de pollution lumineuse (diffusée par l'atmosphère terrestre) et potentiellement perçue par l'œil humain, entre 5 % (scotopique) et 15 % (mésopique, tel que défini à la section 4).

On peut aussi visualiser ces résultats sous forme de graphique, en ajoutant aussi nos prédictions lorsque la transition DEL sera complétée, ainsi que nos prédictions sur l'effet qu'aurait entraîné le choix de différentes températures d'éclairage :



**Figure 25.** Effet actuel de la transition aux DEL à Montréal sur la contribution au dôme de pollution lumineuse perçue dans différentes conditions d'éclairage ambiant (trait noir plein). Le cercle noir indique notre situation mésopique de référence, correspondant à une condition d'éclairage relativement sombre pour l'observation astronomique. Le trait pointillé indique le maintien de la pollution lumineuse perçue; la région au-dessus du trait pointillé indique une aggravation de la pollution lumineuse, et vice-versa. Les traits pleins de couleur indiquent l'effet qu'aurait eu la transition à différentes températures d'éclairage, après l'achèvement de la transition aux DEL.

La figure 25 révèle que l'impact de la transition à l'éclairage DEL n'aurait pas été sans impact sur la pollution lumineuse si la Ville avait choisi une température d'éclairage à 4000 K, comme cela avait initialement été prévu en 2014. En effet, dans toute condition d'éclairage pertinente pour les observations astronomiques (sous 0,1 cd/m²), nous aurions observé une dégradation de la qualité du ciel étoilé, malgré l'adoption d'une illuminance au sol 30 % sous la norme et malgré l'éclairage direction-



nel. Cette figure montre aussi qu'à terme, on peut s'attendre à une amélioration deux fois plus grande de la pollution lumineuse avec les DEL à 3000 K (diminution de 29 % en régime mésopique).

Notre modèle nous permet aussi de prédire quel aurait été l'effet de la transition à l'éclairage DEL si le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal n'avait **pas** fait le choix de réduire l'illuminance au sol 30 % par rapport à la norme RP-8-14. Encore une fois, la situation ne serait pas aussi réjouissante :

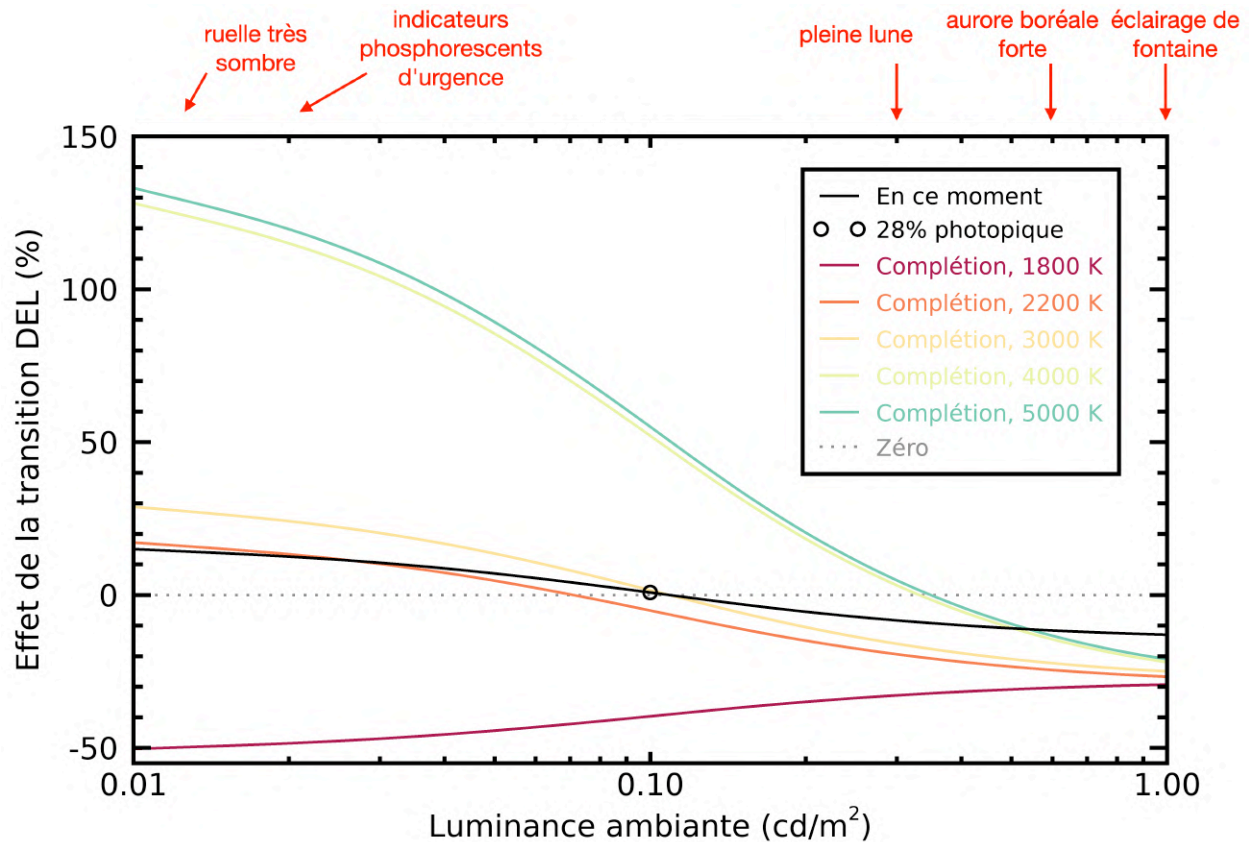


Figure 26. Effet de la transition aux DEL à Montréal sur la contribution au dôme de pollution lumineuse perçue dans différentes conditions d'éclairage ambiant, si le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal n'avait pas fait le choix de réduire l'illuminance au sol 30 % sous la norme d'éclairage RP-8-14.

La figure 26 indique que la pollution lumineuse aurait été aggravée pour toute température d'éclairage sauf 1800 K si le Service de l'urbanisme et de la mobilité de la Ville de Montréal avait choisi de suivre de manière stricte la norme RP-8-14. **Il sera donc crucial de réviser cette norme d'éclairage au regard de la meilleure visibilité engendrée par l'éclairage aux DEL, sans quoi l'adoption de cette nouvelle technologie aura un effet dévastateur sur la pollution lumineuse.**

Les calculs présentés plus haut brossent le portrait d'une situation dont l'issue s'avère positive dans le cas des choix précis qui ont été faits à la Ville de Montréal, mais qui aurait pu être catastrophique en terme de pollution lumineuse si la Ville n'avait pas adopté l'**ensemble** des trois stratégies suivantes :

- Choisir une température d'éclairage de 3000 K ou moins;
- Choisir des montures qui limitent significativement l'éclairage vers le haut;
- Réduire l'illuminance au sol de 30 % par rapport à la norme d'éclairage RP-8-14, laquelle est mal adaptée pour l'éclairage aux DEL.

Ces constats, basés sur nos mesures empiriques, formeront la base de nos recommandations formulées à la section 8.

Il faut noter que nos calculs ne permettent pas de considérer l'impact des différences potentielles dans l'éclairage près de l'horizon entre les luminaires au sodium et ceux au DEL. Une modélisation détaillée de la distribution angulaire de la lumière émise par ces différents luminaires et des obstacles au sol sera requise pour améliorer l'exactitude de nos résultats. Dans une situation où beaucoup d'obstacles de grande taille sont présents (par exemple au centre-ville de Montréal), on pourrait s'attendre à une modification négligeable. Cependant, l'inclusion de cet effet dans une situation plus dégagée nous permettrait d'inclure dans nos prévisions une plus grande contribution relative de pollution lumineuse de la part des DEL qui font usage de l'éclairage directionnel. Dans ce dernier cas, on pourrait ainsi s'attendre à un effet moins optimiste de la transition aux DEL sur la pollution lumineuse perçue au sol.

Une limitation additionnelle de notre étude concerne la fraction inconnue de l'irradiance causée par les sources d'éclairage qui ne sont pas contrôlées par la Ville de Montréal. Même si notre analyse s'est concentrée spécifiquement sur des zones résidentielles contenant une grande densité de luminaires contrôlés par la Ville de Montréal, on pourrait imaginer qu'une fraction non-négligeable d'éclairage domestique relativement constant affecterait nos conclusions en diluant les effets de la transition aux DEL<sup>9</sup>. Nos données indiquent que cette fraction d'autres sources d'éclairage ne peut pas être supérieure à 29 % en moyenne dans les 32 régions sélectionnées à la section 6. Le cas extrême de 29 % indiquerait que la transition aux DEL aurait entièrement éliminé la contribution des luminaires contrôlés par la Ville de Montréal au signal détecté par VIIRS. Les autres valeurs entre 0 et 29% auraient pour effet de rendre nos conclusions plus optimistes, c'est-à-dire que la transition aux DEL aurait réduit la pollution lumineuse de façon plus significative que nos résultats l'indiquent.

---

<sup>9</sup> Si on désigne la fraction moyenne de la radiance provenant des luminaires contrôlés par la Ville de Montréal dans les 32 régions sélectionnées à la section 6 par le symbole  $\sigma$ , les équations de la section 4 s'en trouveraient modifiées en remplaçant toutes les occurrences de  $\beta$  par  $\beta\sigma^2$ .

## 7. Images de la Station spatiale internationale

Les astronautes à bord de la Station spatiale internationale ont pris quelques photos de la région de Montréal en février 2021 (identifiants [ISS064-E-37999](#), [ISS064-E-38000](#) et [ISS064-E-38001](#)). La seconde image de cette séquence est particulièrement intéressante :



Figure 27. Les environs de Montréal photographiés depuis la Station spatiale internationale en février 2021 (image ISS064-E-38000). Crédit : NASA.

On voit à la figure 27 un ensemble de sources lumineuses dont les couleurs et les intensités sont très différentes. La Ville de Laval (à gauche), par exemple, n'a pas initié la transition aux DEL et on remarque que la majorité de l'éclairage sur son territoire est de couleur orangée, correspondant à des luminaires au sodium. Cependant, on y remarque aussi un ensemble de sources blanches très intenses, qui pourrait indiquer que l'éclairage commercial utilise graduellement davantage de sources lumineuses DEL à 5000 K.

Un recadrage sur le centre-ville de Montréal nous montre aussi que l'éclairage y est particulièrement intense, et de couleur bleutée, potentiellement attribuable à l'éclairage au DEL à température de couleur élevée :



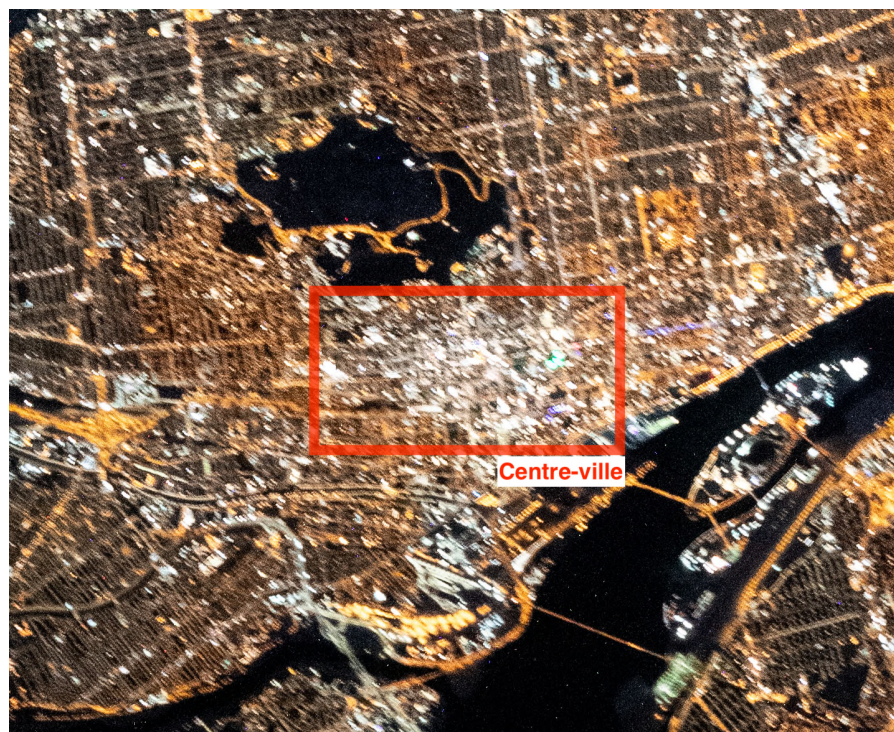


Figure 28. Les environs du centre-ville de Montréal photographiés depuis la Station spatiale internationale en février 2021. Crédit : NASA.

Un gros plan sur le parc industriel d'Anjou nous révèle un scénario encore plus inquiétant, où la quantité d'éclairage de couleur bleue est remarquable :



Figure 29. Le parc industriel d'Anjou photographié depuis la Station spatiale internationale en février 2021. Crédit : NASA.



On peut aussi observer la gare de triage Taschereau du Canadien National avec un recadrage de l'image ISS064-E-37999 :



Figure 30. La gare de triage Taschereau du Canadien National photographiée depuis la Station spatiale internationale en février 2021. Crédit : NASA.

La teinte orangée indique l'utilisation de luminaires au sodium. L'éclairage utilisé dans ce secteur est aussi d'une intensité remarquable, et on peut imaginer qu'une éventuelle transition aux DEL pourrait avoir un impact considérable sur la pollution lumineuse dans le Grand Montréal si une température d'éclairage supérieure à 3000 K était choisie.



Enfin, un recadrage différent de la première image permet de comparer deux quartiers montréalais voisins : Saint-Sulpice, où la transition aux DEL est complétée, et André-Grasset, où les anciens luminaires sont encore en place.

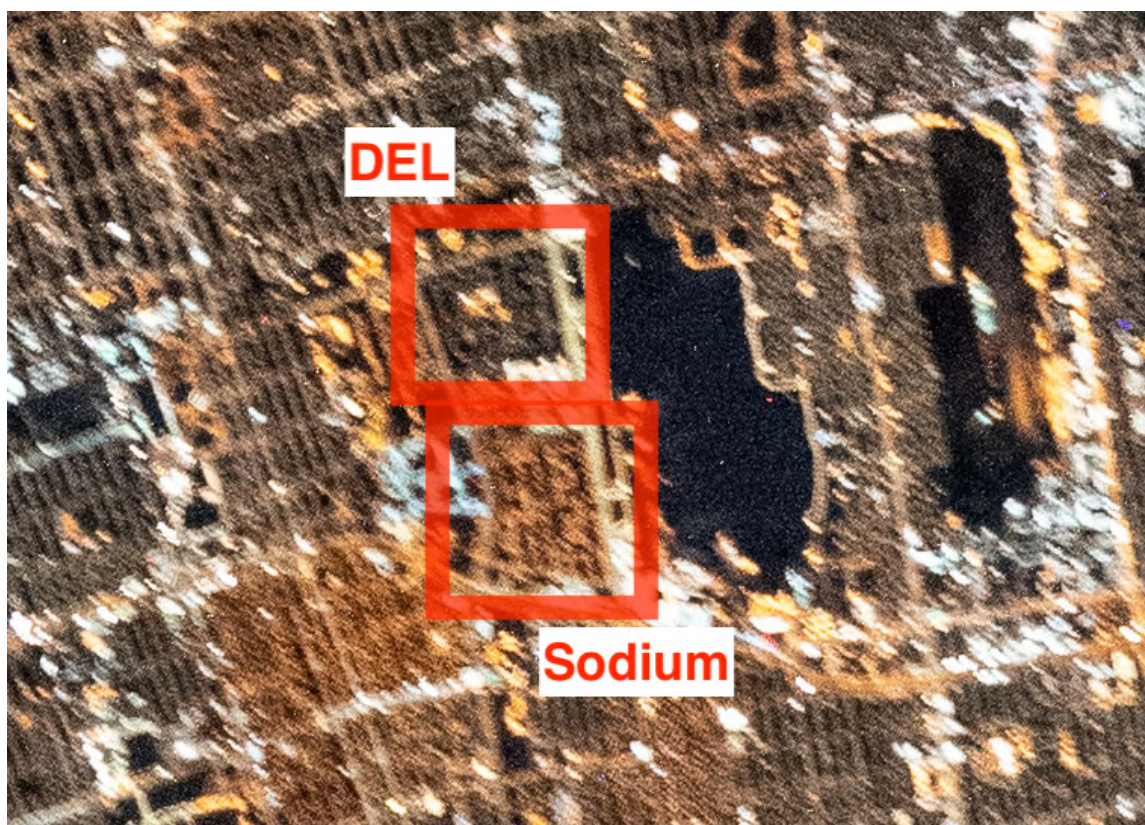


Figure 31. Les environs des quartiers montréalais Saint-Sulpice (en haut) et André-Grasset (en bas) photographiés depuis la Station spatiale internationale en février 2021. Crédit : NASA.

On constate que l'éclairage aux DEL, bien que de couleur plus bleutée, apparaît néanmoins beaucoup moins intense que celui donné par les anciens luminaires au sodium. Cette observation représente en soi une bonne nouvelle : puisque cette photographie a été prise avec un appareil-photo numérique conventionnel, dont la réponse spectrale est similaire à celle de l'œil humain, on peut imaginer que la contribution à la pollution lumineuse par ces luminaires DEL a effectivement diminué grâce à la combinaison de l'éclairage directionnel et de l'illuminance au sol réduite de 30 % sous la norme RP-8-14. Cette observation est aussi cohérente avec nos calculs basés sur les données de la caméra VIIRS.

Le fait que cette photographie dénote une diminution de l'éclairage vers le ciel après la transition aux DEL même au mois de février est aussi une excellente nouvelle pour la pollution lumineuse à Montréal, car on aurait pu s'attendre à ce que la réflexion causée par la neige au sol réduise l'efficacité de l'éclairage directionnel. Il semble ici que cette perte d'efficacité en éclairage directionnel ne soit pas suffisante pour rendre la transition aux DEL particulièrement problématique.



## 8. Recommandations

À la lumière de notre analyse, les recommandations suivantes visent à permettre la transition à l'éclairage DEL sans aggraver significativement la pollution lumineuse :

1. Les DEL à température d'éclairage de plus de 3000 K sont à éviter absolument.
2. Les luminaires à technologie DEL procurent une meilleure perception des couleurs; ceci offre en retour l'opportunité de réduire l'illumination au sol de 30 % par rapport à la norme RP-8-14.
3. Les luminaires à éclairage directionnel strictement vers le bas doivent être utilisés.

Pour être efficaces, ces recommandations doivent être mises en œuvre conjointement. En effet, nos données indiquent que si l'on omet de respecter une seule de ces recommandations, la transition à la technologie DEL aura un impact néfaste sur la pollution lumineuse. Le non-respect de l'ensemble de ces recommandations pourrait dans certains cas tripler la quantité de pollution lumineuse en conservant l'illuminance au sol.

En plus des trois recommandations principales énumérées ci-haut, nous considérons qu'il serait aussi souhaitable de tirer profit de la plus grande flexibilité des luminaires DEL pour réduire la pollution lumineuse sans augmenter les risques liés à la sécurité et à la visibilité :

4. L'intensité des DEL peut être ajustée pour compenser leur vieillissement et maintenir le niveau d'éclairage désiré sans avoir à le dépasser initialement.
5. L'intensité d'éclairage de certains luminaires DEL pourrait être réduite après une certaine heure durant la nuit. [Walker et al. \(2020\)](#) ont déjà émis des recommandations à cet effet auprès de l'Organisation des Nations Unies : ce rapport préconise en effet de réduire l'illuminance à 10% de sa valeur normale après minuit dans les régions peu actives, ou au maximum à 66% de sa valeur normale partout ailleurs.

## 9. Conclusion et travaux futurs

Ce rapport fait état de notre étude des données de la caméra VIIRS à bord du satellite *Suomi NPP* afin de mesurer l'effet de la transition aux DEL à Montréal. Notre analyse, qui tient compte de la réponse spectrale de l'œil humain, des variations saisonnières de la pollution lumineuse et de la diffusion atmosphérique, indique que la transition aux DEL effectuée par la Ville de Montréal a potentiellement eu un impact légèrement bénéfique sur le dôme de pollution lumineuse perçu par l'œil humain lorsqu'il est adapté à la noirceur totale (diminution de 5%). Toutefois, en situation sombre plus représentative des conditions d'observation astronomique à Montréal, cette projection s'élève à une réduction de 15 % du dôme de pollution lumineuse (ou jusqu'à 29 % lorsque la transition aux DEL sera complétée).

Nos calculs indiquent que le choix des DEL à température d'éclairage de 3000 K ou moins a été crucial pour ne pas aggraver la pollution lumineuse, en plus de l'utilisation des luminaires directionnels et de la réduction de 30 % de l'illuminance au sol. La transition aux DEL représente un risque significatif pour la pollution lumineuse si ces choix ne sont pas tous respectés, et peut dans certains cas aller jusqu'à tripler la pollution lumineuse perçue sans changement à l'illuminance au sol.

Il sera crucial de sensibiliser le public à cet enjeu et d'établir des réglementations appropriées, sans quoi l'éclairage institutionnel, commercial, industriel et domestique aggraverait certainement la pollution lumineuse à Montréal et ailleurs dans un futur rapproché.

Notre étude est limitée dans ses prédictions par le fait que nous n'avons pas considéré la radiance émise près de l'horizon, et nous avons négligé la contamination par l'éclairage provenant d'autres sources que la Ville de Montréal dans nos échantillons de données. Notre étude a aussi ignoré l'effet de l'aveuglement direct pouvant être causé par la présence d'un luminaire dans le champ de vision d'une personne observant le ciel depuis le sol. Bien qu'un tel résultat dépendra fortement de sa position géographique exacte, il serait intéressant de déterminer si le nombre de luminaires directement visibles est significativement réduit avec l'utilisation de luminaires à éclairage directionnel, et si la technologie DEL cause un effet d'aveuglement plus marqué à illuminance égale.

D'autres études seront aussi nécessaires pour déterminer l'impact de la lumière plus bleutée des DEL sur la santé humaine et la biodiversité, et pour mieux comprendre comment la *perception* de sécurité est changée par les différents modes d'éclairage et l'illuminance au sol adoptée. Il sera notamment important de considérer une analyse différenciée selon les genres (ADS+) dans une telle étude.

Nous tenons à remercier Chris Moeller du *Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies* à l'Université du Wisconsin et à Jeffrey McIntire de *Science Systems and Applications, Inc.* pour leur aide avec l'utilisation de la réponse spectrale VIIRS appropriée pour notre analyse.

## Références

- Aubé, M., A. Simoneau, C. Muñoz-Tuñón, J. Díaz-Castro, and M. Serra-Ricart. 2020. *Restoring the Night Sky Darkness at Observatorio del Teide: First Application of the Model Illumina Version 2*. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** 497, no. 3: 2501–2516 (July). <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2113>.
- Boynton, R. M., and K. F. Purl. 1989. *Categorical Colour Perception Under Low-Pressure Sodium Lighting with Small Amounts of Added Incandescent Illumination*. **Lightning Research & Technology** 21, no. 1: 23–27 (August). <https://doi.org/10.1177/1077096032718902100104>.
- Dong, L., L. Qin, W. Xu, and L. Zhang. 2017. *The Impact of LED Correlated Color Temperature on Visual Performance Under Mesopic Conditions*. **IEEE Photonics Journal** 9, no. 6 (December). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2760257>.
- French-Constant, R. H., R. Somers-Yeates, J. Bennie, T. Economou, D. Hodgson, A. Spalding, and P. K. McGregor. 2016. *Light Pollution is Associated with Earlier Tree Budburst Across the United Kingdom*. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences** 283, no. 1833 (June). <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0813>.
- Garcia-Saenz, A., A. Sánchez de Miguel, A. Espinosa et al. 2018. *Evaluating the Association between Artificial Light-at-Night Exposure and Breast and Prostate Cancer Risk in Spain (MCC-Spain Study)*. **Environmental Health Perspectives** 126, no. 4 (April). <https://doi.org/10.1289/ehp1837>.
- Garcia-Saenz, A., A. Sánchez de Miguel, A. Espinosa et al. 2019. *Artificial light at night (ALAN), blue light spectrum exposure and colorectal cancer risk in Spain (MCC-Spain study)*. **Abstracts of the 2019 Annual Conference of the International Society for Environmental Epidemiology** (August). <https://doi.org/10.1097/01.EE9.0000608172.33912.a5>.
- Hölker, F., C. Wolter, E. K. Perkin, and K. Tockner. 2010. *Light Pollution as a Biodiversity Threat*. **Trends in Ecology and Evolution** 25, no. 12: 681–682 (December). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>.
- Hung, L.-W., S. J. Anderson, A. Pipkin, K. Fristrup. 2021. *Changes in night sky brightness after a countywide LED retrofit*. **Journal of Environmental Management** 292: 112776 (August). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112776>.
- Katti, C., M. Stacey-Solis, N. A. Coronel-Rojas, and W. I. L. Davies. 2019. *The Diversity and Adaptive Evolution of Visual Photopigments in Reptiles*. **Frontiers in Ecology and Evolution** 7: 352 (September). <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00352>.
- Keshet-Sitton, A., K. Or-Chen, E. Huber, and A. Haim. 2016. *Illuminating a Risk for Breast Cancer: A Preliminary Ecological Study on the Association Between Streetlight and Breast Cancer*. **Integrative Cancer Therapies** 16, no. 4: 451–463 (November). <https://doi.org/10.1177/1534735416678983>.

- Kinzey, B., T. E. Perrin, N. J. Miller, M. Kocifaj, M. Aubé, and H. S. Lamphar. *An Investigation of LED Street Lighting's Impact on Sky Glow*. Richland: **U.S. Department of Energy**, 2017. Consulté le 9 juin, 2021. [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/2017\\_led-impact-sky-glow.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/2017_led-impact-sky-glow.pdf)
- Kneizys, F. X., E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, Jr., L. W. Abreu, J. E. A. Selby, R. W. Fenn, and R. A. McClatchey. 1980. *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 5*. Dayton: **U.S. Air Force Geophysics Laboratory**.
- Kyba, C. C. M., T. Kuester, A. S. de Miguel, K. Baugh, A. Jechow, F. Hölker, J. Bennie, C. D. Elvidge, K. J. Gaston, and L. Guanter. 2017. *Artificially Lit Surface of Earth at Night Increasing in Radiance and Extent*. **Science Advances** 3, no. 11 (November). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>.
- Luginbuhl, C. B., P. A. Boley, and D. R. Davis. 2014. *The Impact of Light Source Spectral Power Distribution on Sky Glow*. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer** 139: 21–26 (May). <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.004>.
- Roby, J. *LSPDD: Lamp Spectral Power Distribution Database*. **Cégep de Sherbrooke** (site web). 2021. <https://lspdd.org>.
- Sollars, P. J., and G. E. Pickard. 2015. *The Neurobiology of Circadian Rhythms*. **Psychiatric Clinics of North America** 38, no. 4: 645–665 (December). <https://doi.org/10.1016/j.psc.2015.07.003>.
- Walker, C., S. Di Pippo, M. Aubé et al. 2020. *Report and recommendations*. **Dark and Quiet Skies for Science and Society online workshop** (October). <https://www.iau.org/static/publications/dqskies-book-29-12-20.pdf>
- Wolf, K. L., S. T. Lam, J. K. McKeen, G. R. A. Richardson, M. van den Bosch, and A. C. Bardekjian, 2020. *Urban Trees and Human Health: A Scoping Review*. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 17: 12 (June). <https://dx.doi.org/10.3390/ijerph17124371>.
- Photopic and Scotopic lumens - 4: When the photopic lumen fails us*. **Visual 3D** (site web). 21 mai 2015. [https://www.visual-3d.com/Education/LightingLessons/Documents/PhotopicScotopiclumens\\_4%202.pdf](https://www.visual-3d.com/Education/LightingLessons/Documents/PhotopicScotopiclumens_4%202.pdf).