

Éclairage de rue aux diodes électroluminescentes (DEL)

Évaluation des risques à la santé

Éclairage de rue aux diodes électroluminescentes (DEL)

Évaluation des risques à la santé

ÉCLAIRAGE DE RUE AUX DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES (DEL) - ÉVALUATION DES RISQUES À LA SANTÉ

Une réalisation de la Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal
(DRSP de Montréal)

1301, rue Sherbrooke Est
Montréal (Québec) H2L 1M3
514 528-2400
www.dsp.santemontreal.qc.ca

Auteurs par ordre alphabétique :

Monique Beausoleil, M. Sc., toxicologue, DRSP de Montréal
Julie Brodeur, M. Sc., toxicologue, DRSP de Montréal
Mireille Carpentier, M. Sc., hygiéniste de l'environnement, DRSP de Montréal
Martine Lévesque, M. Sc., toxicologue, DRSP de Montréal
Louis-François Tétreault, Ph. D., toxicologue, DRSP de Montréal

Avec la collaboration de :

Mathieu Gauthier, Ph. D., conseiller scientifique
Institut national de santé publique du Québec

Révision linguistique :

Sylvie B. Roberge, agente administrative

Illustrations :

Élise Chartrand, pour les figures 12, 20, 21, 22 et 27

Nous remercions :

Annie Mercier, M. Sc., Radioprotection et sécurité laser de l'Université Laval pour la révision de certains calculs.
Stéphane Perron, M.D. et Karine Price, M. Sc., toxicologue, de la DRSP de Montréal pour la relecture du document.

Contribution financière :

Ministère de la Santé et des Services sociaux

© Direction régionale de santé publique
CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal (2016)

ISBN 978-2-550-77376-4 (En ligne)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2016
Bibliothèque et Archives Canada, 2016

MOT DU DIRECTEUR

Depuis quelques années, de nombreuses municipalités québécoises, d'Amérique du Nord, d'Europe et d'ailleurs dans le monde, procèdent au remplacement de leurs luminaires de rue traditionnels par un éclairage aux diodes électroluminescentes (DEL).

La Ville de Montréal s'apprête à convertir son éclairage de rue par des luminaires DEL à 4 000°K. Certains citoyens ont exprimé des préoccupations relativement au risque sanitaire associé à une plus grande proportion de lumière bleue émise par cette technologie. La Ville de Montréal a alors demandé un avis de santé à la Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal. Le présent avis est donc produit dans le cadre de notre mandat d'identification des situations susceptibles de mettre en danger la santé de la population, d'expertise-conseil auprès des partenaires régionaux et d'information à la population.

Après avoir effectué une analyse de la littérature scientifique traitant des effets sur la santé de la lumière bleue et évalué les niveaux d'exposition réels de la population à la lumière bleue émise par les luminaires de rue DEL à 4 000°K, nous considérons que le projet de conversion de l'éclairage de rue au DEL ne présente pas de risque pour la santé de la population montréalaise.

Je vous souhaite une bonne lecture!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Richard Massé', with a stylized, flowing script.

Richard Massé, M.D.
Directeur régional de santé publique de Montréal
du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal

RÉSUMÉ

Les sources d'éclairage de rue traditionnelles sont progressivement remplacées par des luminaires de rue intégrant des diodes électroluminescentes (DEL) en raison de leurs avantages, notamment leur durée de vie beaucoup plus longue et leur plus faible consommation d'énergie.

Au cours des prochaines années, la Ville de Montréal projette de remplacer ses luminaires existants (luminaires de rue sodium haute pression (HPS) et luminaires de rue aux halogénures métalliques (HM)) par des luminaires DEL ayant une température de couleur de 4 000°K. Certains citoyens ont exprimé des préoccupations relativement à la plus grande proportion de lumière bleue émise par ces luminaires DEL. La Ville de Montréal a alors demandé un avis de santé à la Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal (DRSP de Montréal) afin de connaître les risques que l'installation de ces luminaires de rue DEL pourrait représenter pour la santé. Pour y répondre, la DRSP de Montréal, en collaboration avec l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), a réalisé une revue de la littérature portant sur les effets de la lumière la nuit sur la santé ainsi qu'une évaluation de l'exposition des citoyens à la lumière bleue émise par les luminaires de rue DEL en vue d'évaluer le risque à la santé¹.

La lumière est l'un des principaux régulateurs des rythmes circadiens. La mélatonine, appelée aussi l'hormone du sommeil, est fréquemment utilisée comme un indicateur de la perturbation des rythmes circadiens. Or, même s'il est bien reconnu que la mélatonine est inhibée lors de l'exposition à la lumière, et particulièrement à la lumière bleue, aucune des études scientifiques répertoriées n'a démontré un effet néfaste sur la santé lié directement à l'inhibition de la mélatonine chez l'humain.

Suite à une analyse critique des études portant principalement sur le cancer du sein et les syndromes métaboliques², il apparaît que l'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure qu'il existe une relation de causalité entre l'exposition à la lumière la nuit et la survenue d'effets néfastes sur la santé.

Les calculs effectués indiquent que l'installation des luminaires de rue DEL à 4 000°K n'entraînera qu'une très faible augmentation de l'exposition des citoyens de la Ville de Montréal à la lumière bleue comparativement aux luminaires de rue HPS actuels. Il est à noter que les niveaux de lumière bleue des luminaires de rue DEL à 4 000°K sont comparables à ceux des luminaires de rue HM en place depuis plusieurs années sur certaines rues de Montréal.

De plus, l'exposition à la lumière bleue émise par les luminaires de rue DEL à 4 000°K est bien inférieure (au moins trois fois moindre) à l'exposition des résidents à la lumière bleue émise par les lampes intérieures - incandescentes, fluorocompactes, halogènes, DEL - qu'on retrouve actuellement dans les habitations. Étant donné que les citoyens passent une plus grande partie de leur soirée à l'intérieur qu'à l'extérieur de leur résidence, il est évident que l'exposition à la lumière bleue provenant des luminaires de rue DEL à 4 000°K est minime. Quant aux quantités de lumière bleue qui entrent à l'intérieur des maisons en provenance des luminaires de rue DEL, elles sont infimes.

¹ Soulignons que cet avis ne traitera pas des impacts des luminaires de rue DEL sur le ciel étoilé, l'environnement, la faune ou la flore. De plus, bien que le but premier de l'éclairage de rue soit d'assurer la sécurité des différents utilisateurs (piétons, cyclistes, automobilistes), la DRSP n'abordera pas cet aspect qui relève plutôt des spécialistes en la matière.

² Les syndromes métaboliques sont définis comme un regroupement de facteurs de risque (obésité, hyperglycémie à jeun, etc.) aux maladies cardiovasculaires et au diabète de type II.

Puisque le lien entre l'exposition à la lumière bleue la nuit et la santé n'est pas démontré et que la conversion aux luminaires de rue DEL à 4 000°K n'entraînera pas d'augmentation significative de l'exposition à la lumière bleue, nous considérons que le projet de conversion ne constitue pas un risque pour la santé de la population.

Cependant, la conception et l'installation d'un nouvel éclairage de rue doivent se faire en ayant recours aux meilleures pratiques dans le domaine afin d'assurer un éclairage de rue sécuritaire. Il sera important d'informer la population lors de l'implantation de cette nouvelle technologie. Il est possible qu'à certains endroits, des citoyens constatent des problèmes d'éblouissement, de lumière intrusive, de manque d'éclairage, etc., qui demanderont des modifications. Il sera alors nécessaire que la Ville de Montréal mette en place un système efficace de gestion des plaintes et qu'elle soit en mesure de corriger rapidement les situations qui nécessiteront des ajustements.

Table des matières

MOT DU DIRECTEUR	II
RÉSUMÉ	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	X
ABRÉVIATIONS.....	XII
1. INTRODUCTION	1
2. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA LUMIÈRE ET DES LUMINAIRES DE RUE	3
2.1 SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	3
2.2 PRINCIPALES UNITÉS DE GRANDEUR RADIOMÉTRIQUES ET PHOTOMÉTRIQUES UTILISÉES EN ÉCLAIRAGE	3
2.3 DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES (DEL)	5
2.4 TEMPÉRATURE DE COULEUR.....	5
2.5 INDICE DE RENDU DE COULEUR	7
2.6 VISION PHOTOPIQUE, SCOTOPIQUE ET CORRECTION MÉSOPIQUE	7
2.7 LAMPADAIRES DE RUE.....	8
2.8 DISTRIBUTION ÉNERGÉTIQUE SPECTRALE DES LUMINAIRES DE RUE.....	9
2.9 DISTRIBUTION DE LA LUMIÈRE AUTOUR DES LAMPADAIRES DE RUE	12
2.9.1 <i>Distribution horizontale de la lumière</i>	12
2.9.2 <i>Distribution latérale de la lumière</i>	12
2.9.3 <i>Distribution verticale de la lumière</i>	13
3. DEUX NORMES APPLICABLES À L'ÉCLAIRAGE DE RUE	17
3.1 NORME RP-8-14 : CONCEPTION SÉCURITAIRE DE L'ÉCLAIRAGE DE RUE	17
3.2 NORME DU BNQ : ÉCLAIRAGE EXTÉRIEUR	18
4. PROJET DE CONVERSION DE LUMINAIRES DE RUE DEL DE LA VILLE DE MONTRÉAL	21
4.1 DESCRIPTION DU PROJET DE CONVERSION DE LUMINAIRES DE RUE DEL DE LA VILLE DE MONTRÉAL	21
4.2 DESCRIPTION DES LUMINAIRES DEL INSTALLÉS LE LONG DES PISTES CYCLABLES DE L'ÎLE-DES-SŒURS.....	22
4.3 SYSTÈME DE GESTION À DISTANCE DE L'ÉCLAIRAGE DE RUE DEL	24
4.4 QUELQUES PROJETS DE CONVERSION AUX LUMINAIRES DE RUE DEL AU QUÉBEC ET AILLEURS DANS LE MONDE	24
5. LUMIÈRE LA NUIT ET SANTÉ	25
RÉSUMÉ	25
5.1 RYTHMES CIRCADIENS.....	26
5.2 MÉLATONINE, UN INDICATEUR DES EFFETS DE LA LUMIÈRE SUR LES RYTHMES CIRCADIENS.....	27
5.2.1 <i>Rôles de la mélatonine</i>	27
5.2.2 <i>Influence de la lumière sur la sécrétion de la mélatonine</i>	28
5.3 EFFETS DE LA LUMIÈRE SUR LA SANTÉ	31
5.3.1 <i>Cancer du sein</i>	32
5.3.2 <i>Syndromes métaboliques</i>	35
5.3.3 <i>Autres effets sur la santé</i>	37
6. ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES DE L'ÉCLAIRAGE DE RUE DEL.....	41
6.1 DÉFINITION DES LONGUEURS D'ONDE ASSOCIÉES À LA LUMIÈRE BLEUE	41

6.2 CALCUL DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION À LA LUMIÈRE BLEUE ÉMISE PAR LES LUMINAIRES DE RUE ET D'AUTRES SOURCES LUMINEUSES INTÉRIEURES	42
6.2.1 Estimation des niveaux d'éclairage.....	42
6.2.2 Estimation de la quantité de lumière bleue.....	44
6.2.3 Comparaison de l'exposition de la population à la lumière bleue émise par les luminaires de rue et présente à l'intérieur de la maison.....	46
6.3 ÉVALUATION DES RISQUES À LA SANTÉ ASSOCIÉS AUX LUMINAIRES DE RUE DEL DE LA VILLE DE MONTRÉAL	49
6.4 REVUE DE QUELQUES ÉVALUATIONS DE RISQUES TIRÉES DE LA LITTÉRATURE	50
7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	53
ANNEXE 1. ÉCLAIREMENT ET LUMINANCE DES SOURCES LUMINEUSES.....	55
ANNEXE 2. QUELQUES SCÉNARIOS D'INSTALLATION DE LUMINAIRES DEL DE LA VILLE DE MONTRÉAL	57
ANNEXE 3. ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX RADIOFRÉQUENCES ÉMISES PAR LE SYSTÈME DE GESTION À DISTANCE DE L'ÉCLAIRAGE DE RUE DEL	59
ANNEXE 4. REVUE DE LITTÉRATURE LUMIÈRE LA NUIT ET SANTÉ.....	61
Revue systématique de la littérature	61
Cancer du sein	63
Syndromes métaboliques	66
Autres effets sanitaires.....	67
ANNEXE 5. EFFETS SUR L'ŒIL ET LA PEAU	69
ANNEXE 6. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE DE L'ÉCLAIREMENT DE LA DRSP	73
ANNEXE 7. CALCUL DE LA PUISSANCE DE LUMIÈRE BLEUE	75
ANNEXE 8. COMPARAISON DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION À LA LUMIÈRE BLEUE ÉMISE PAR LES LUMINAIRES DE RUE (8 LUX) ET PRÉSENTE À L'INTÉRIEUR DE LA MAISON (67 LUX)	85
LISTE DES RÉFÉRENCES	87

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. PRINCIPAUX TERMES UTILISÉS POUR DÉFINIR LES GRANDEURS RADIOMÉTRIQUES ET LES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES EN ÉCLAIRAGE	4
TABLEAU 2. TEMPÉRATURE DE COULEUR DE LA LUMIÈRE DE DIFFÉRENTES SOURCES LUMINEUSES.....	6
TABLEAU 3. INDICE DE RENDU DE COULEUR DE QUELQUES LUMINAIRES ET LAMPES INTÉRIEURES.....	7
TABLEAU 4. NIVEAUX D'ÉCLAIREMENT RECOMMANDÉS POUR LES TROTTOIRS EN MILIEU URBAIN SELON LA NORME RP-8-14..	18
TABLEAU 5. RECOMMANDATIONS D'ÉCLAIRAGE POUR LA ZONE ZEN-3 (MUNICIPALITÉ DE PLUS DE 100 000 HABITANTS)	19
TABLEAU 6. QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DES LUMINAIRES DE RUE DEL DE LA VILLE DE MONTRÉAL.....	22
TABLEAU 7. CARACTÉRISTIQUES DES LUMINAIRES DEL INSTALLÉS LE LONG DES PISTES CYCLABLES DE L'ÎLE-DES-SŒURS.....	23
TABLEAU 8. RÉSUMÉ DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉTUDES RÉPERTORIÉES SUR LES EFFETS SUR LA SANTÉ EN LIEN AVEC L'EXPOSITION À LA LUMIÈRE LA NUIT POUR LA POPULATION GÉNÉRALE	39
TABLEAU 9. NIVEAUX D'ÉCLAIREMENT À L'ŒIL SUR LES TROTTOIRS ET À L'INTÉRIEUR DES RÉSIDENCES.....	44
TABLEAU 10. COMPARAISON DE L'EXPOSITION À LA LUMIÈRE BLEUE ÉMISE LORS D'UNE MARCHÉ SUR LE TROTTOIR D'UNE RUE RÉSIDENTIELLE (3 LUX) ÉCLAIRÉE PAR DIFFÉRENTS TYPES DE LUMINAIRES DE RUE, LORS DE LA LECTURE D'UN LIVRE PAPIER ÉCLAIRÉ PAR DIFFÉRENTS TYPES DE LAMPES INTÉRIEURES (27 LUX) ET DANS LA CHAMBRE À COUCHER AVEC LES LAMPES INTÉRIEURES ÉTEINTES ET LES RIDEAUX FERMÉS (0,1 LUX) – LUMINAIRE DE RUE DEL 88 W À 4 000°K	47
TABLEAU 11. NIVEAUX D'ÉCLAIREMENT ET DE LUMINANCE DE DIFFÉRENTES SOURCES LUMINEUSES.....	55
TABLEAU 12. NIVEAUX D'ÉCLAIREMENT ET DE LUMINANCE DE LA CHAUSSEE ET DES TROTTOIRS ESTIMÉS DANS QUATRE SCÉNARIOS DE REMPLACEMENT DE LUMINAIRE DE RUE HPS PAR DES LUMINAIRES DE RUE DEL SUR LE TERRITOIRE DE LA VILLE DE MONTRÉAL.....	58
TABLEAU 13. NIVEAUX D'EXPOSITION AUX RF AUTOUR DES CONTRÔLEURS DU SYSTÈME DE GESTION DES LUMINAIRES DE RUE DEL	59
TABLEAU 14. LISTE DES TERMES UTILISÉS POUR LES ÉQUATIONS DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	61
TABLEAU 15. COMPARAISON DE L'EXPOSITION À LA LUMIÈRE BLEUE ÉMISE LORS D'UNE MARCHÉ SUR LE TROTTOIR D'UNE ARTÈRE (8 LUX) ET LORS DE LA LECTURE D'UN LIVRE PAPIER ÉCLAIRÉ PAR DIFFÉRENTS TYPES DE LAMPES INTÉRIEURES (67 LUX) – LUMINAIRE DE RUE 108 W À 4 000°K.....	86

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. LUMIÈRE VISIBLE DANS LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	3
FIGURE 2. TECHNOLOGIE UTILISÉE POUR LES DEL.....	5
FIGURE 3. PHOTOGRAPHIES DE QUELQUES LUMINAIRES DE RUE DEL	5
FIGURE 4. COULEUR ET TEMPÉRATURE DE COULEUR DE LUMINAIRES DEL	6
FIGURE 5. FONCTIONS D'EFFICACITÉ LUMINEUSE SPECTRALE PHOTOPIQUE ET SCOTOPIQUE.....	8
FIGURE 6. EXEMPLE DE LAMPADAIRES PIÉTONS (GAUCHE) ET DE LAMPADAIRES DE RUE (DROITE).....	9
FIGURE 7. FLUX ÉNERGÉTIQUE SPECTRAL D'UN LUMINAIRE VAPEUR DE MERCURE 175 W À 4 061°K	9
FIGURE 8. FLUX ÉNERGÉTIQUE SPECTRAL D'UN LUMINAIRE HPS 117 W À 2 022°K.....	10
FIGURE 9. FLUX ÉNERGÉTIQUE SPECTRAL RELATIF D'UN LUMINAIRE HM 400 W À 4 700°K	10
FIGURE 10. RÉPARTITION SPECTRALE D'UN LUMINAIRE DEL 40 W À 4 000°K.....	11
FIGURE 11. RÉPARTITION SPECTRALE D'UN LUMINAIRE DEL AMBRÉES 107 W À 1 912°K.....	11
FIGURE 12. DISTRIBUTION DE LA LUMIÈRE À PARTIR D'UN LAMPADAIRE DE RUE	12
FIGURE 13. CLASSIFICATION DE LA DISTRIBUTION LATÉRALE DE LA LUMIÈRE AU SOL SELON L'IES.....	13
FIGURE 14. ZONE DE PERTE DE LUMIÈRE VERS LE CIEL (A), D'ÉCLAIRAGE ÉBLOUISSANT ET INTRUSIF (B) ET D'ÉCLAIRAGE UTILE (C) D'UN LUMINAIRE	13
FIGURE 15. EXEMPLE D'UN ÉCLAIRAGE EXTÉRIEUR CRÉANT DE L'ÉBLOUISSEMENT	14
FIGURE 16. ÉCLAIRAGE LIMITANT LA LUMIÈRE INTRUSIVE (GAUCHE) ET FAVORISANT LA LUMIÈRE INTRUSIVE (DROITE).....	14
FIGURE 17. ANGLES SOLIDES DE LA DISTRIBUTION DE LA LUMIÈRE À L'ARRIÈRE, À L'AVANT ET AU-DESSUS DU LUMINAIRE DE RUE	15
FIGURE 18. EXEMPLES DE LUMINAIRES DE RUE (GAUCHE) ET DE LUMINAIRES PIÉTONS SANS VASQUE (DROITE)	21
FIGURE 19. PORTIONS DE PISTES CYCLABLES (LIGNES ROUGES) DE L'ÎLE-DES-SŒURS ÉCLAIRÉES PAR DES LUMINAIRES DEL	23
FIGURE 20. EXEMPLE DE RYTHMES CIRCAIDIENS	26
FIGURE 21 : VOIE RÉTINO-HYPOTHALAMIQUE STIMULÉE PAR LA LUMIÈRE	27
FIGURE 22. VARIATION DES NIVEAUX DE LA MÉLATONINE DURANT LA JOURNÉE	27
FIGURE 23. RELATION ENTRE L'ÉCLAIREMENT À L'ŒIL ET LA CONCENTRATION PLASMATIQUE DE LA MÉLATONINE	29
FIGURE 24. COURBE DE SENSIBILITÉ DE LA MÉLATONINE AUX DIFFÉRENTES LONGUEURS D'ONDE (COURBE BLEUE À GAUCHE) ..	30
FIGURE 25. LONGUEURS D'ONDE DU SPECTRE VISIBLE (380 À 780 NM)	41
FIGURE 26. COMPARAISON DU FLUX ÉNERGÉTIQUE SPECTRAL D'UN LUMINAIRE HPS 150 W À 2 100°K (COURBE ROUGE), D'UN LUMINAIRE HM 150 W À 3 500°K (COURBE VERTE) ET D'UN LUMINAIRE DEL 88 W À 4 000°K (COURBE BLEUE)	45
FIGURE 27. LOCALISATION DES POINTS A, B ET C SITUÉS PRÈS D'UN CONTRÔLEUR À DISTANCE DES LUMINAIRES DE RUE DEL OÙ ONT ÉTÉ ESTIMÉS LES NIVEAUX D'EXPOSITION AUX RF.....	60
FIGURE 28. ILLUSTRATION DES DIFFÉRENTES PROFONDEURS DE PÉNÉTRATION DES RAYONNEMENTS OPTIQUES DANS L'ŒIL SELON LA LONGUEUR D'ONDE	69
FIGURE 29. LA COURBE « BLUE LIGHT » (FONCTION $B(\lambda)$) REPRÉSENTE LE SPECTRE D'ACTION DE LA LUMIÈRE BLEUE SUR LA RÉTINE POUR LA POPULATION GÉNÉRALE. LA COURBE « APHAKIC » (FONCTION $A(\lambda)$) REPRÉSENTE LE SPECTRE D'ACTION DE LA LUMIÈRE BLEUE POUR LES PERSONNES APHAKES.	70
FIGURE 30. COMPARAISON DU FLUX ÉNERGÉTIQUE SPECTRAL D'UN LUMINAIRE HPS 250 W À 2 100°K (COURBE ROUGE) ET D'UN LUMINAIRE DEL 108 W À 4 000°K (COURBE BLEUE).....	85

ABRÉVIATIONS

ANSI : *American national standards institute*

AMA : *American medical association*

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaires de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BNQ : Bureau de normalisation du Québec

BUG rating : *Backlight, Uplight, Glare (forwardlight)*

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

DEL : Diode électroluminescente

DRSP de Montréal : Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal

HM : Halogénures métalliques

HPS : Sodium haute pression

ICNIRP : *International commission on non-ionizing radiation protection*

IDA : *International Dark-Sky Association*

IES : *Illuminating Engineering Society*

IR : Infrarouge

IRC : Indice de rendu de couleur

RF : Radiofréquence

UV : Ultraviolet

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, les sources d'éclairage traditionnelles, tant au niveau de l'éclairage intérieur que de l'éclairage de rue, sont remplacées progressivement par des dispositifs intégrant des diodes électroluminescentes (DEL) en raison des avantages intéressants que comporte l'éclairage aux DEL, notamment en ce qui concerne leur durée de vie beaucoup plus longue et leur plus faible consommation d'énergie.

Au cours des prochaines années, la Ville de Montréal prévoit remplacer ses luminaires de rue, principalement des luminaires sodium haute pression (HPS) et certains luminaires aux halogénures métalliques (HM), par des luminaires DEL ayant une température de couleur de 4 000 degrés Kelvin (°K). Des projets pilotes sont actuellement en cours à différents endroits sur le territoire de Montréal, tel qu'au centre-ville et dans l'arrondissement Saint-Laurent.

Montréal n'est pas la première ville à procéder à l'installation de luminaires de rue DEL. Plusieurs autres villes du Québec, d'Amérique du Nord, d'Europe et d'ailleurs dans le monde procèdent également à ce type de conversion de leur éclairage de rue. Des études techniques ont déjà été réalisées, et se poursuivent, afin de fournir les données pertinentes permettant de faire les meilleurs choix en termes de luminaires de rue DEL.

Toutefois, certains ont émis des réserves quant à l'utilisation de l'éclairage de rue DEL, notamment en ce qui concerne la protection du ciel étoilé, en particulier dans les régions situées près de sites protégés comme celui de l'ASTROLab du parc national du Mont-Mégantic. D'autres arguments concernent aussi les effets des luminaires DEL sur l'environnement, la faune et la flore.

Des préoccupations relativement à la santé sont également évoquées quant à l'utilisation des luminaires de rue DEL en raison de leur plus grande proportion de lumière bleue comparativement à celle des luminaires traditionnels. Certains propos cités dans les médias à ce sujet sont particulièrement inquiétants. Par exemple, on y rapporte que la pollution lumineuse occasionnée par les luminaires de rue DEL serait associée à une augmentation des risques de cancers, de diabète, d'obésité et de problèmes de santé mentale³.

En raison des préoccupations de santé provenant de ses citoyens, la Ville de Montréal a demandé, en juin 2015, un avis de santé à la Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal (DRSP de Montréal) afin d'évaluer les risques que l'éclairage de rue DEL à 4 000°K pourrait représenter pour la santé. L'arrondissement de Verdun a également fait une demande en ce sens, en septembre 2015, concernant des luminaires DEL installés pour l'éclairage de pistes cyclables à l'Île-des-Sœurs. D'autres municipalités au Québec ont aussi exprimé de tels questionnements santé aux directions de santé publique de leur région.

La DRSP de Montréal a donc rédigé le présent avis, en collaboration avec l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), qui porte spécifiquement sur les risques potentiels que l'éclairage de rue DEL à 4 000°K pourrait présenter pour la santé de la population. Soulignons que cet avis ne traitera pas des impacts des luminaires de rue DEL sur le ciel étoilé, l'environnement, la faune ou la flore. De plus, bien que le but premier de l'éclairage de rue soit d'assurer la sécurité des différents

³ Informations tirées d'articles publiés dans le Journal de Montréal, le 20 février 2016 et dans le journal The Gazette, le 5 février 2016.

utilisateurs (piétons, cyclistes, automobilistes), la DRSP n’abordera pas cet aspect qui relève plutôt des spécialistes en la matière.

Le lecteur trouvera dans ce document une description des principales caractéristiques de la lumière et des luminaires de rue DEL (section 2), un résumé de deux normes qui s’appliquent à l’éclairage de rue (section 3), une description du projet de conversion des luminaires de rue de la Ville de Montréal (section 4), une revue de la littérature portant sur les effets de la lumière la nuit sur la santé (section 5), une évaluation des risques sanitaires de l’éclairage de rue DEL (section 6) ainsi que les conclusions et les recommandations de la DRSP de Montréal concernant les risques à la santé associés à l’éclairage de rue DEL (section 7).

2. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA LUMIÈRE ET DES LUMINAIRES DE RUE

Cette section présente différentes notions concernant la lumière et les luminaires de rue afin de permettre au lecteur de mieux comprendre le projet de conversion aux luminaires de rue DEL (section 4) ainsi que l'analyse du risque pour la santé (section 6).

2.1 Spectre électromagnétique

Dans le spectre électromagnétique, la lumière visible se situe entre les rayonnements ultraviolets (UV) et les rayonnements infrarouges (IR), et elle comprend les longueurs d'onde s'échelonnant entre 380 et 780 nm (Figure 1). Contrairement aux autres formes de rayonnement électromagnétique, la lumière visible est perceptible par l'œil humain. Elle est constituée de plusieurs couleurs : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange et rouge. Comme tous les rayonnements, la lumière visible transporte de l'énergie et ce sont les courtes longueurs d'onde (violet) qui en transportent le plus comparativement aux plus longues longueurs d'onde (rouge) (ANSES, 2010).

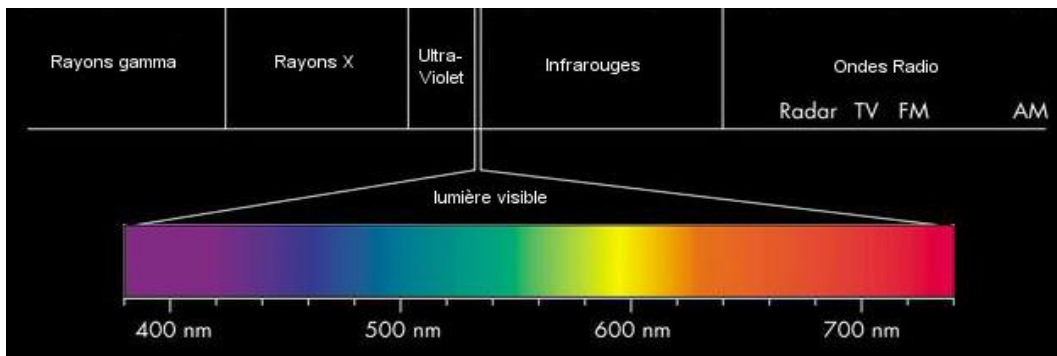


Figure 1. Lumière visible dans le spectre électromagnétique

Source : Vauthier, 2010

2.2 Principales unités de grandeur radiométriques et photométriques utilisées en éclairage

La radiométrie est le domaine qui étudie la mesure des rayonnements; on y définit des grandeurs énergétiques telles le flux énergétique, l'intensité énergétique, la luminance énergétique et l'éclairement énergétique (Tableau 1). La photométrie est la science qui étudie le rayonnement lumineux tel qu'il est perçu par la vision humaine; on y définit des grandeurs lumineuses telles le flux lumineux, l'intensité lumineuse, la luminance lumineuse et l'éclairement lumineux. Certaines de ces grandeurs seront utilisées dans ce document pour évaluer les risques des luminaires de rue DEL sur la santé. À titre d'information, il est possible de consulter le niveau d'éclairement (lux) ainsi que la luminance (cd/m^2) de différentes sources lumineuses au tableau de l'Annexe 1.

Tableau 1. Principaux termes utilisés pour définir les grandeurs radiométriques et les grandeurs photométriques en éclairage

GRANDEUR RADIOMÉTRIQUE			GRANDEUR PHOTOMÉTRIQUE		
Grandeur énergétique (terme anglais)	Unité de mesure	Définition	Grandeur lumineuse (terme anglais)	Unité de mesure	Définition
Flux énergétique ¹ (<i>Radiant flux</i>)	watt (W)	Puissance totale d'un rayonnement visible émis par la source ou reçue sur une surface donnée	Flux lumineux (<i>Luminous flux</i>)	lumen (lm)	Quantité totale de lumière émise dans toutes les directions par une source lumineuse
Intensité énergétique (<i>Radiant intensity</i>)	watt par stéradian (W/sr)	Flux énergétique émis par une source ponctuelle, selon une unité d'angle solide et une direction donnée	Intensité lumineuse (<i>Luminous intensity</i>)	candela (cd)	Lumière visible émise dans une direction donnée
Luminance énergétique (<i>Radiance</i>)	watt par mètre carré par stéradian (W/m ² /sr)	Flux énergétique passant ou émis en un point d'une surface et dans une direction donnée selon une unité de surface et une unité d'angle solide	Luminance lumineuse (<i>Luminance</i>)	candela par mètre carré (cd/m ²)	Intensité d'une source lumineuse selon sa surface
Éclairement énergétique ² (<i>Irradiance</i>)	watt par mètre carré (W/m ²)	Flux énergétique par unité de surface	Éclairement lumineux ³ (<i>Illuminance</i>)	lux (lx)	Quantité de lumière reçue sur une surface

Source : ANSES, 2010 et DiLaura et coll., 2011

¹ Le flux énergétique sera utilisé à la section 6 afin de connaître la quantité de lumière bleue reçue par des individus situés sur le trottoir et dans la maison.

² L'éclairement énergétique sera utilisé pour évaluer le *Blue light hazard* à l'Annexe 4.

³ L'éclairement lumineux sera utilisé pour quantifier la quantité de lumière reçue à l'œil en provenance des luminaires de rue à la section 6.

2.3 Diodes électroluminescentes (DEL)

Une diode électroluminescente (DEL) est un dispositif opto-électronique émettant de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique direct. Les DEL produisent toutes une lumière monochromatique. Pour couvrir tout le spectre visible et ainsi obtenir une lumière blanche, on combine généralement une DEL qui émet du bleu avec un luminophore⁴ jaune (Figure 2). La diode blanche a ouvert la porte à de nouvelles applications dans les domaines de l'éclairage et des appareils électroniques (ANSES, 2010; ADEME, 2014). La Figure 3 présente des exemples de luminaires de rue DEL. Ils comportent plusieurs diodes placées en rangées qui forment généralement une surface plane.

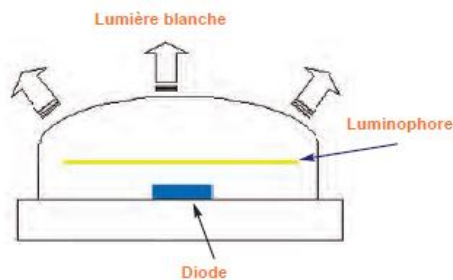


Figure 2. Technologie utilisée pour les DEL

Source : Carsat Nord-Est, 2013



Figure 3. Photographies de quelques luminaires de rue DEL

Source : Ville de Montréal, 2016

2.4 Température de couleur

La température de couleur, mesurée en degrés Kelvin (°K), permet de caractériser la « teinte » de blanc de la lumière. Une lumière de type « blanc chaud » possède une température de couleur inférieure à 3 500°K (lumière blanche avec une teinte jaune), une lumière de type « blanc neutre » a une température de couleur de 3 500 à 5 500°K et une lumière de type « blanc froid » a une température de couleur de plus de 5 500°K (lumière blanche avec une teinte bleue) (Behar-Cohen et coll., 2011).

Les luminaires de rue DEL disponibles sur le marché peuvent présenter différentes températures de couleur (environ 2 700 à environ 6 500°K). Certains luminaires de rue DEL peuvent même avoir une température de

⁴ Un luminophore est une substance qui émet de la lumière lorsqu'elle est excitée.

couleur d'environ 1 800°K et sont alors appelées DEL ambrées. La Figure 4 permet de constater la variation de la teinte de la lumière blanche émise par des luminaires DEL en fonction de leur température de couleur.

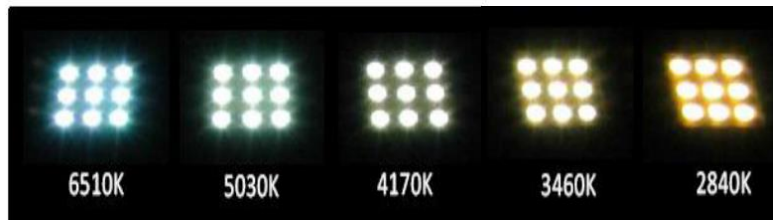


Figure 4. Couleur et température de couleur de luminaires DEL

Source : Duval, 2012

Le Tableau 2 présente la température de couleur de la lumière de plusieurs sources lumineuses naturelles, extérieures et intérieures. La température de couleur de la pleine lune est de 4 100°K et celle de la lumière du jour est de 6 500°K. La température de couleur des anciens luminaires de rue Vapeur de mercure et celle des luminaires DEL que la Ville de Montréal souhaite installer sont de 4 000°K. La température de couleur des luminaires HM varie de 3 500 à 5 000°K. La température de couleur des luminaires de rue DEL ambrées est d'environ 1 800 – 1 900°K et celle des luminaires HPS est d'environ 2 000°K. Pour les lampes intérieures, la température de couleur des ampoules incandescentes varie de 2 254 à 2 800°K, celle des ampoules halogènes de 2 700 à 3 000°K, celle des ampoules fluorocompactes et des DEL varient de 3 000 à 5 000°K, et celle des tubes fluorescents s'étend de 3 000 à 6 500°K.

Tableau 2. Température de couleur de la lumière de différentes sources lumineuses

TYPE DE LUMIÈRE	TEMPÉRATURE DE COULEUR (°K)	SOURCE
Éclairage naturel		
Lumière de la lune	4 100	Laperrière, 2011
Lumière du jour	6 500	Behar-Cohen et coll., 2011
Éclairage extérieur		
Luminaire de rue Vapeur de mercure	4 000	Laperrière, 2014
Luminaire de rue HPS	2 100	Kinzey, 2016
Luminaire de rue HM	3 500 à 5 000	Kinzey, 2016
Luminaire de rue DEL ambrées	1 872	Kinzey, 2016
Luminaire de rue DEL	2 700 à 6 500	Kinzey, 2016
Luminaire de rue DEL de la Ville de Montréal	4 000	Ville de Montréal, 2016
Éclairage intérieur		
Ampoule incandescente	2 254 à 2 800	Roby et coll., 2016
Ampoule halogène	2 700 à 3 000	Roby et coll., 2016
Ampoule fluorocompacte	2 569 – 5 000	Roby et coll., 2016
Tube fluorescent domestique	3 000 (blanc chaud) 6 500 (blanc froid: <i>Daylight</i>)	Behar-Cohen et coll., 2011
Ampoule de lampe DEL intérieur	3 000 à 5 000	ANSES, 2010

Note : Les données de température de couleur peuvent varier légèrement selon les auteurs consultés.

2.5 Indice de rendu de couleur

L'indice de rendu de couleur (IRC) caractérise « [...] l'aptitude d'une source lumineuse à restituer les différentes couleurs des objets qu'elle éclaire, par rapport à une source de référence » (ANSES, 2010).

L'IRC de la lumière du jour est de 100. On considère qu'une bonne source lumineuse rendra parfaitement la couleur si elle possède un IRC supérieur à 90. Les luminaires de rue HPS actuellement en place ont un IRC inférieur à 50; ils ne permettent pas de bien distinguer les couleurs et réduisent les performances visuelles. L'IRC des luminaires de rue DEL varie généralement de 70 à 90, bien que celui des luminaires DEL ambrées soit plus faible (40). À l'intérieur, l'IRC des différents types d'ampoules est élevé (>90) (Tableau 3) (ANSES, 2010; Laperrière, 2014).

Tableau 3. Indice de rendu de couleur de quelques luminaires et lampes intérieures

TYPE DE LUMINAIRES OU DE LAMPES	INDICE DE RENDU DE COULEUR
Source naturelle	
Lumière du jour	100
Luminaires extérieurs	
Luminaire de rue HPS	< 50
Luminaire de rue Vapeur de mercure	≈ 50
Luminaires de rue HM	60 à 95
Luminaires de rue DEL	Généralement de 70 à 90
Luminaires de rue DEL ambrées (1 800°K)	≈ 40
Lampes intérieures	
Ampoule incandescente	100
Ampoule halogène	100
Tubes fluorescents	> 90

Source : ANSES, 2010; Laperrière, 2014

2.6 Vision photopique, scotopique et correction mésopique

La perception de l'environnement varie beaucoup selon l'intensité de lumière disponible. Les couleurs et les détails de l'environnement sont bien perçus en pleine lumière du jour alors qu'ils sont estompés et difficilement perceptibles durant la nuit.

On appelle vision photopique la vision durant la journée ou en condition d'éclairage important (luminance supérieure à 10 cd/m²). Elle est essentiellement assurée par les cônes de la rétine de l'œil qui permettent d'analyser les couleurs et les détails. Durant la nuit, ou lorsque la luminance est inférieure à 0,001 cd/m², la vision est appelée vision scotopique. Seuls les bâtonnets de la rétine de l'œil sont utilisés. Ni les couleurs, ni les détails de l'environnement ne sont alors perçus. Lorsque la luminance varie entre 0,001 à 10 cd/m², on parle de vision mésopique au cours de laquelle les cônes et les bâtonnets de la rétine sont actifs. La vision mésopique pourrait être appliquée lors de certaines circonstances en éclairage de rue (DiLaura et coll., 2011).

La sensibilité de l'œil n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde. Elle est décrite par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale, soit la relation entre le flux lumineux perçu par l'œil humain (lm) et le flux énergétique du rayonnement reçu (watt) selon les différentes longueurs d'onde. La Figure 5 présente les fonctions d'efficacité lumineuse spectrales de la vision photopique et de la vision scotopique. La courbe

d'efficacité lumineuse spectrale pour la vision mésopique se situe entre la courbe photopique et la courbe mésopique (DiLaura et coll., 2011).

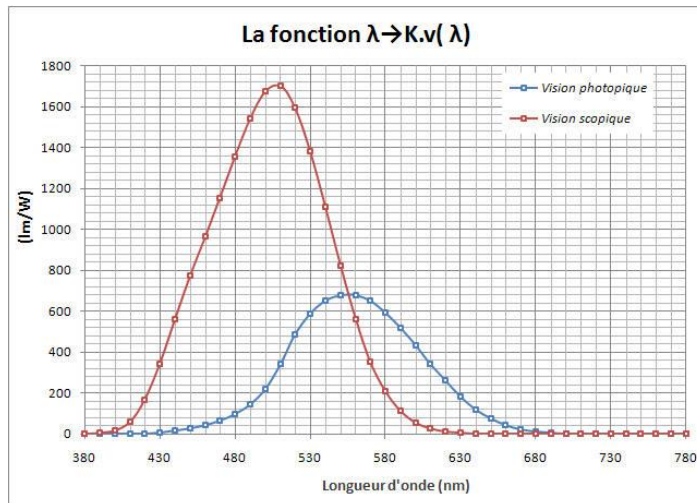


Figure 5. Fonctions d'efficacité lumineuse spectrale photopique et scotopique

Source : Adapté de DiLaura et coll., 2011

Les données de flux lumineux (lumen) des luminaires de rue sont généralement fournies en vision photopique. Pour certaines applications d'éclairage de rue, une correction mésopique est parfois appropriée. Le lecteur intéressé par l'utilisation de la correction mésopique pour l'éclairage de rue peut consulter la norme ANSI/IES RP-8-14 (IES, 2014) et le rapport de Laperrière, 2011.

2.7 Lampadaires de rue

Deux grands types de lampadaires de rue sont présents sur le territoire de la Ville de Montréal : les lampadaires piétons et les lampadaires de rue (Figure 6). Il existe également des lampadaires de rue combinés (rue et piétons). Les lampadaires piétons sont souvent décoratifs et généralement moins hauts que les lampadaires de rue. Ils peuvent être utilisés le long des trottoirs, dans les stationnements, dans les parcs et le long des pistes cyclables. Les lampadaires de rue sont installés le long des rues et quelques fois dans le terre-plein situé au centre des voies des boulevards.

Dans le présent document, le terme « luminaire de rue » est utilisé pour représenter les luminaires des lampadaires piétons et les luminaires des lampadaires de rue utilisés sur la voie publique.

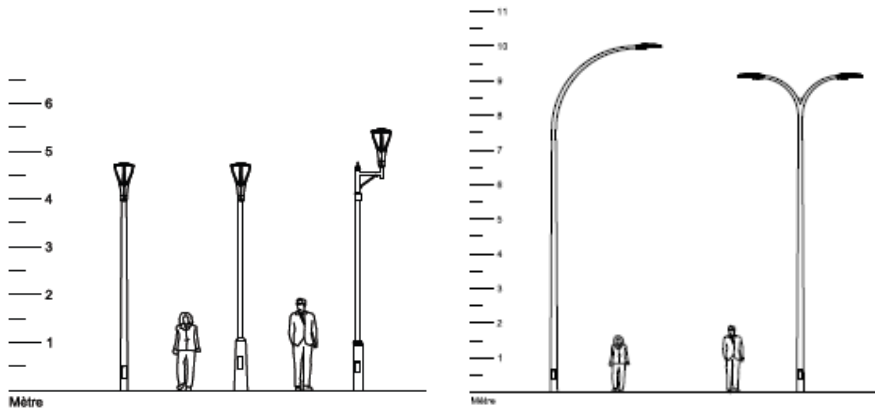


Figure 6. Exemple de lampadaires piétons (gauche) et de lampadaires de rue (droite)

Source : Ville de Montréal, 2016

2.8 Distribution énergétique spectrale des luminaires de rue

L'éclairage de rue électrique est apparu dans les années 1900. Les technologies utilisées ont alors évolué, passant des luminaires à arc aux luminaires incandescents et aux luminaires Vapeur de mercure. Ces derniers ont ensuite été remplacés par les luminaires HPS au milieu des années 1990 ainsi que par des luminaires aux halogénures métalliques (HM). Aujourd'hui, les responsables municipaux et les spécialistes en éclairage se tournent vers la technologie DEL pour l'éclairage de rue (Suarez et Nguyen, 2014).

Chaque type de luminaires de rue présente une distribution énergétique spectrale typique, c'est-à-dire une répartition de la puissance par nanomètre (W/nm) de chacune des longueurs d'onde du spectre de lumière visible (380 à 780 nm). Ces données sont nécessaires afin de connaître la quantité de lumière bleue émise par des sources lumineuses (section 6.2). La répartition énergétique spectrale de cinq grands types de luminaires de rue (Vapeur de mercure, HPS, HM, DEL à 4 000°K et DEL ambrées) déjà utilisés dans le passé et actuellement en fonction au Québec est présentée ci-après.

Les anciens luminaires Vapeur de mercure présentaient des pics de flux énergétique spectral étroits et importants dans la zone des longueurs d'onde de bleu (405 nm et 435 nm), de vert, d'orange et de rouge (Figure 7). Ces luminaires produisaient de la lumière blanche dont la température de couleur était de l'ordre de 4 000°K (Laperrière, 2014).

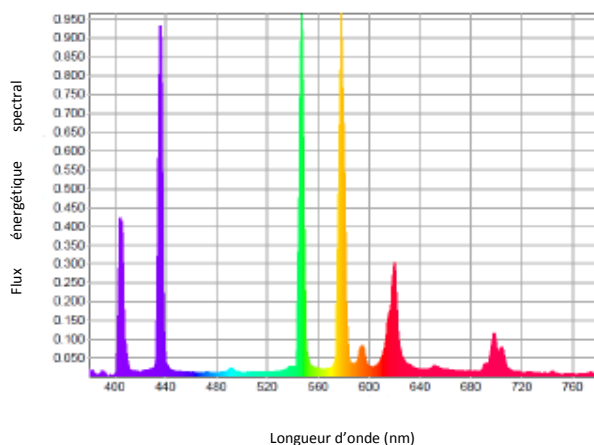


Figure 7. Flux énergétique spectral d'un luminaire Vapeur de mercure 175 W à 4 061°K

Source : Adapté de Laperrière, 2014

Afin de réduire les coûts d'éclairage, les luminaires Vapeur de mercure ont ensuite été remplacés par des luminaires HPS qui sont aujourd'hui utilisés dans les rues de Montréal. La proportion de lumière bleue de ces luminaires est très faible comparativement à la lumière émise dans le jaune-orange-rouge (Figure 8). Les luminaires HPS produisent une couleur plutôt jaunâtre et leur température de couleur est d'environ 2 000°K (Laperrière, 2014).

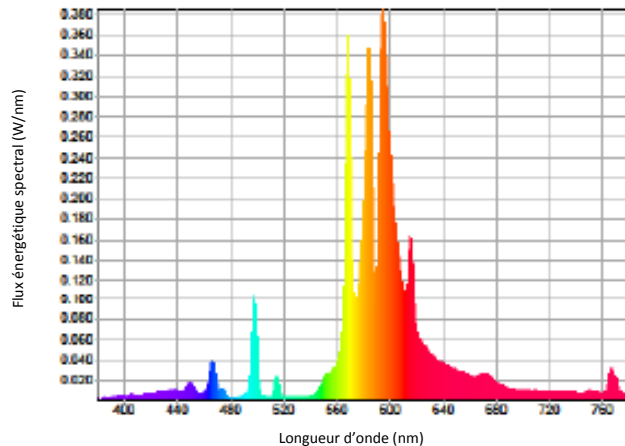


Figure 8. Flux énergétique spectral d'un luminaire HPS 117 W à 2 022°K

Source : Adapté de Laperrière, 2014

En plus des luminaires HPS, on retrouve des luminaires de rue HM dans les rues de Montréal. Ces luminaires présentent des pics de flux énergétique spectral dans les zones de bleu, de vert, de jaune et de l'orange. Leur lumière est blanche et leur température de couleur varie d'environ 3 500 à 5000°K. La Figure 9 présente le flux énergétique spectral relatif (unités arbitraires : sans unité) d'un luminaire HM. Contrairement aux autres figures de flux énergétique spectral, la Figure 9 tirée de Roby et coll., 2016 présente aussi les données pour les longueurs d'ondes situées dans l'UV (< 380 nm).

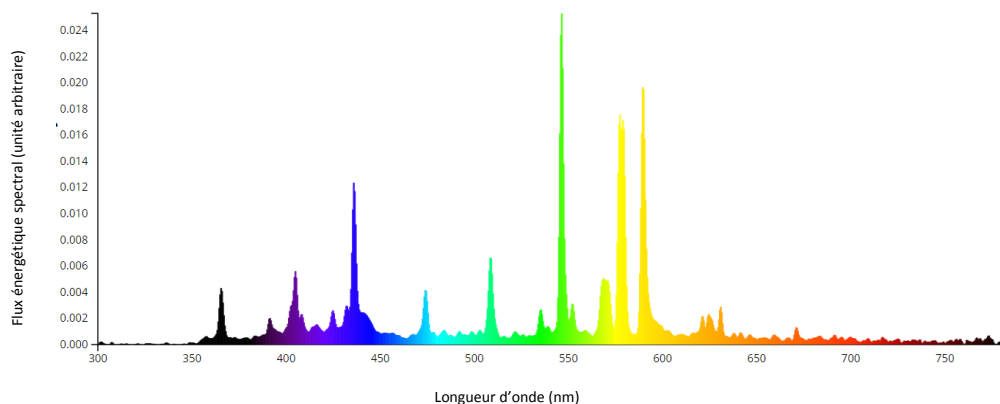


Figure 9. Flux énergétique spectral relatif d'un luminaire HM 400 W à 4 700°K

Source : Adapté de Roby et coll., 2016

Le projet de conversion de l'éclairage de rue de la Ville de Montréal prévoit remplacer les luminaires actuels (HPS et HM) par des luminaires DEL à 4 000°K. Ce type de luminaire émet une lumière blanche, et comporte un pic de flux énergétique important dans la zone de bleu (environ 450 nm) et un autre pic beaucoup plus large dans les zones du jaune-orange-rouge (Figure 10) (Ville de Montréal, 2016).

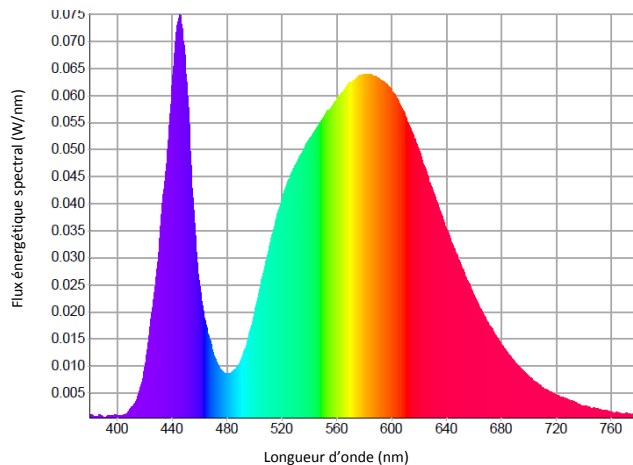


Figure 10. Répartition spectrale d'un luminaire DEL 40 W à 4 000°K

Source : Adapté de Ville de Montréal, 2016

Il existe également des luminaires DEL ambrées qui permettent de réduire le contenu de lumière bleue (<500 nm) à environ 1% comparativement au 31% pour les luminaires DEL à 4 000°K (section 6.2.2). Par exemple, la Figure 11 présente la répartition spectrale d'un luminaire DEL ambrées de 1 912°K. Le pic dans la région du bleu est très faible (Laperrière, 2014). Notons cependant que l'IRC pour le luminaire de rue DEL à 1 912°K (IRC=39 de la Figure 11) est beaucoup plus faible que celui du luminaire de rue DEL à 4 000°K (IRC=73 de la Figure 10).

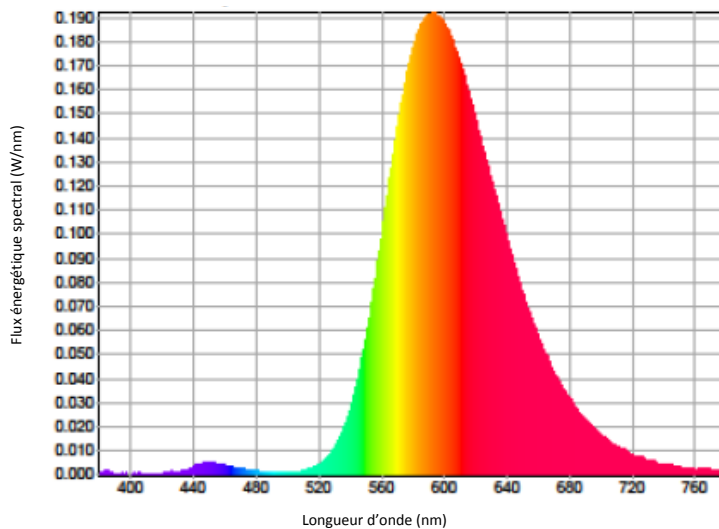


Figure 11. Répartition spectrale d'un luminaire DEL ambrées 107 W à 1 912°K

Source : Adapté de Laperrière, 2014

2.9 Distribution de la lumière autour des lampadaires de rue

Lors de l'installation d'un lampadaire de rue, il est important que la lumière émise autour du lampadaire éclaire suffisamment les zones à éclairer, ne perde pas inutilement de lumière, ni ne crée d'éblouissement ou de lumière intrusive (Figure 12). Pour ce faire, il existe des règles qui définissent la distribution horizontale, latérale et verticale de la lumière autour des lampadaires de rue qui sont brièvement abordées dans les sections suivantes.

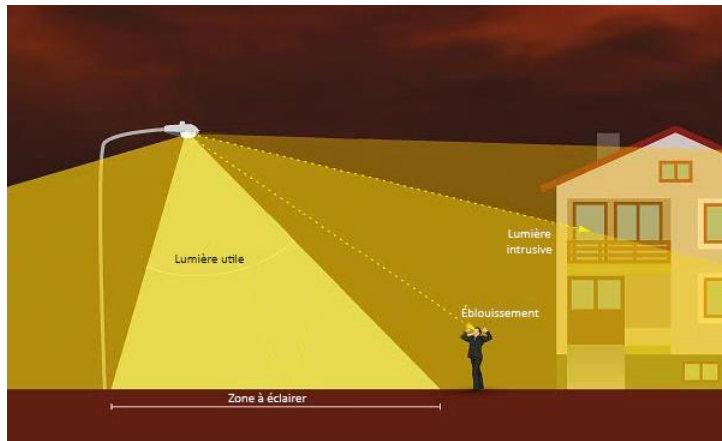


Figure 12. Distribution de la lumière à partir d'un lampadaire de rue

Source : Adapté de Nicoloso et coll., 2013

2.9.1 Distribution horizontale de la lumière

Le niveau d'éclairement horizontal provenant d'un luminaire de rue représente la quantité de lumière moyenne qui arrive sur une surface horizontale, généralement au sol. Exprimé en termes d'éclairement (lux) ou de luminance (cd/m^2), il permet de déterminer si la voie publique est suffisamment éclairée (Legris, 2006; IES, 2014).

2.9.2 Distribution latérale de la lumière

L'*Illuminating Engineering Society* (IES) a établi une classification de la distribution latérale de la lumière au sol, qui s'échelonne du Type I au Type V et qui est illustrée à la Figure 13, tirée de Laperrière, 2011. Laperrière décrit également quelques applications qui sont destinées à ces types d'éclairage :

« De façon générale, on peut affirmer :

- i. une distribution de Type I sert à l'éclairage des ruelles;
- ii. une distribution de Type II pour l'éclairage de rue à deux voies;
- iii. une distribution de Type III est principalement utilisée pour l'éclairage des rues à trois voies ou de larges surfaces;
- iv. une distribution de Type IV est surtout utilisée pour l'éclairage des stationnements et
- v. une distribution de Type V est principalement utilisée dans l'éclairage des parcs, des places publiques et des entrées d'édifices et éclaire la même distance tout autour des luminaires [...] » (Laperrière, 2011).

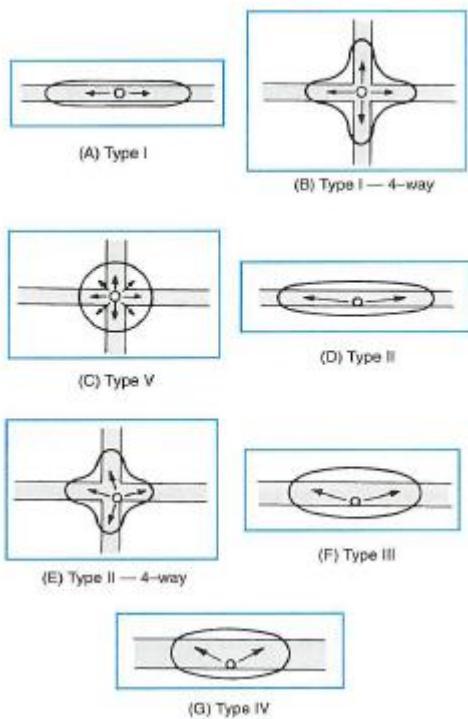


Figure 13. Classification de la distribution latérale de la lumière au sol selon l'IES

Source : Laperrière, 2011

2.9.3 Distribution verticale de la lumière

La distribution verticale de la lumière autour d'un lampadaire de rue peut créer une perte de lumière vers le ciel (zone A : au-dessus de l'horizon), générer de l'éblouissement et de la lumière intrusive (zone B) et éclairer adéquatement la chaussée et le trottoir (zone C) (Figure 14) (Legris, 2006).

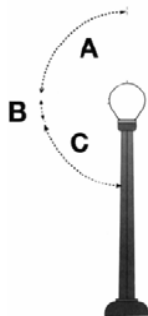


Figure 14. Zone de perte de lumière vers le ciel (A), d'éclairage éblouissant et intrusif (B) et d'éclairage utile (C) d'un luminaire

Source : Legris, 2006

L'**éblouissement** peut empêcher de voir correctement les objets ou les obstacles présents dans le champ de vision, tel qu'illustré à la Figure 15. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à générer de l'éblouissement. Legris, 2006 mentionne notamment : « la lumière émise à moins de 10° sous l'horizon », « un niveau d'éclairement trop élevé », « une puissance trop élevée de la source lumineuse », etc. (Legris, 2006).



Figure 15. Exemple d'un éclairage extérieur créant de l'éblouissement

Source : Legris, 2006

La **lumière intrusive** correspond à la lumière qui éclaire en dehors des voies publiques et qui entre dans les maisons. L'illustration de gauche de la Figure 16 montre une situation où le flux lumineux est dirigé seulement vers les endroits où il est nécessaire. La chaussée et les espaces piétonniers sont suffisamment éclairés pour offrir la visibilité requise, tandis que les maisons environnantes ne sont pas éclairées. Dans l'illustration de droite de cette figure, la lumière est émise dans plusieurs directions, vers le ciel et les maisons, ce qui n'est pas souhaité (Legris, 2006).



Source : Lumec



Source : Lumec

Figure 16. Éclairage limitant la lumière intrusive (gauche) et favorisant la lumière intrusive (droite)

Source : Legris, 2006

Il existe deux systèmes de classification de la distribution verticale de la lumière d'un luminaire : le système de classification de défilement (*Cutoff classification*) et le système de classification des luminaires (*LCS : Luminaire Classification System*).

Le **système de classification de défilement** a été établi dans la norme IES TM-3 (citée dans IES, 2014). Parmi les différentes catégories de défilement, la catégorie « défilement absolu » ou « *full cutoff* » indique que le flux lumineux n'est pas émis au-dessus de l'horizon (les différentes catégories sont décrites dans Laperrière, 2011). La Ville de Montréal, 2016 exigera que les luminaires de rue prévus dans le projet de conversion soient classés « défilement absolu » (section 4.1).

Le **système de classification des luminaires**, décrit dans la norme IES TM-15-11, détermine la quantité d'éclairage permis dans différents angles solides autour du luminaire en fonction de cinq zones (LZ0, zone naturelle où l'éclairage n'est pas nécessaire à LZ4, zone d'activités humaines importantes qui nécessite une quantité élevée d'éclairage) (IDA et IES, 2009; IES, 2011). Ces angles solides peuvent être situés devant le luminaire (*Forwardlight*), derrière le luminaire (*Backlight*) ou au-dessus du luminaire (*Uplight*), appelé *BUG ratings* (Ashdown, 2015; 1000Blubs Lighting Blog, 2016). Les luminaires de rue retenus dans le projet de conversion de la Ville de Montréal devront présenter un *Uplight* de U0, c'est-à-dire qu'ils ne doivent pas émettre de lumière au-dessus de 90° et pas plus de 10 lumens dans les angles solides BVH (*Backlight very high*) et FVH (*Forwardlight very high*) (Figure 17).

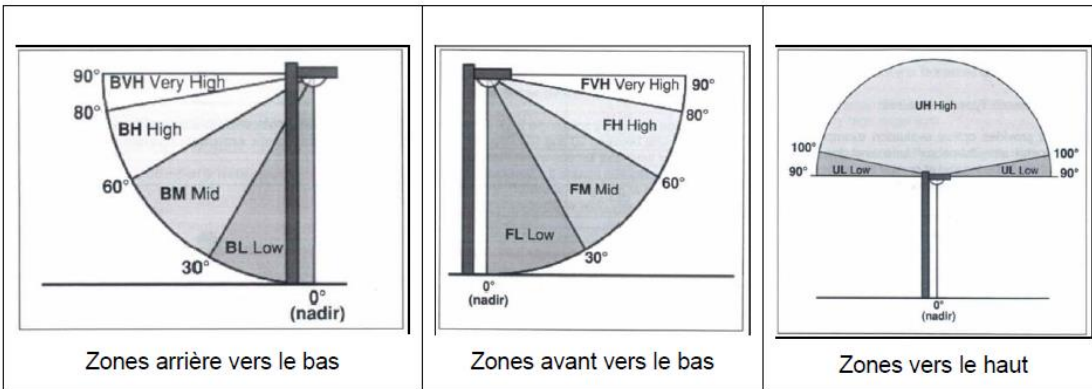


Figure 17. Angles solides de la distribution de la lumière à l'arrière, à l'avant et au-dessus du luminaire de rue

Source : Laperrière, 2011

3. DEUX NORMES APPLICABLES À L'ÉCLAIRAGE DE RUE

En Amérique du Nord, l'*Illuminating Engineering Society* (IES) publie périodiquement des normes (*standards*) afin d'encadrer la conception sécuritaire d'éclairage, dont l'éclairage de rue⁵. La norme ANSI/IES RP-8-14, ci-après appelée la norme RP-8-14 est l'une des plus importantes et est présentée dans cette section. Les recommandations de cette norme concernant l'éclairage sur les trottoirs sont présentées à la section 3.1 puisque le présent avis vise à estimer les risques de l'éclairage de rue DEL à 4 000°K pour la population générale. Le lecteur intéressé aux recommandations au niveau des rues peut consulter la norme RP-8-14.

Le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) a récemment publié la norme *Éclairage extérieur – Contrôle de la pollution lumineuse*, ci-après appelée norme du BNQ. Elle propose des recommandations en matière d'éclairage extérieur, incluant l'éclairage de rue, en fonction du type d'occupation du territoire (zones de conservation, zones rurales et zones urbaines). Les recommandations de la norme du BNQ qui sont spécifiques aux grandes municipalités comme la Ville de Montréal sont brièvement présentées à la section 3.2.

3.1 Norme RP-8-14 : Conception sécuritaire de l'éclairage de rue

Les recommandations de la norme RP-8-14 visent à ce que l'éclairage de rue fournisse une visibilité adéquate afin que les usagers de la route (piétons, cyclistes et véhicules) aient suffisamment de temps pour poser les actions appropriées lorsque des obstacles surgissent sur la route (IES, 2014). L'éclairage de rue doit également procurer un sentiment de sécurité aux piétons et aux autres usagers de la route.

Les niveaux d'éclairement (lux) recommandés sur les trottoirs en milieu urbain varient en fonction de la densité de piétons (Tableau 4). Pour s'assurer que les piétons sont bien visibles, la norme RP-8-14 recommande de mesurer l'éclairement horizontal (E au niveau du sol) et l'éclairement vertical (EV mesuré à 1,5 m de hauteur dans les deux directions et parallèlement au sens de la circulation des piétons). À titre d'exemple, dans les secteurs urbains où la densité de piétons est moyenne, il est recommandé de maintenir un éclairement moyen minimal de 5 lux au sol sur le trottoir et un éclairement moyen vertical de 2 lux à 1,5 m de hauteur (Tableau 4).

⁵ Le lecteur trouvera sur le site Internet de l'IES <http://www.ies.org/> toutes les autres normes publiées à ce jour en matière d'éclairage de rue.

Tableau 4. Niveaux d'éclairage recommandés pour les trottoirs en milieu urbain selon la norme RP-8-14

Densité de piétons	Usagers de la route	NIVEAUX D'ÉCLAIREMENT MINIMUMS À MAINTENIR SUR LES TROTTOIRS		
		Éclairage horizontal moyen au sol E_{moy} (lux)	Éclairage vertical à 1,5 m au-dessus du sol EV_{min} (lux)	Ratio d'éclairage horizontal au sol moyen/minimum $E_{\text{moy}}/E_{\text{min}}$
Élevée (≥100 piétons/heure)	Piétons et véhicules (intersections)	20	10	4
	Piétons seulement	10	5	4
Moyenne (11 à 99 piétons/heure)	Piétons seulement	5	2	4

Source : IES, 2014

3.2 Norme du BNQ : Éclairage extérieur

Le BNQ a publié une norme qui a pour objectif de spécifier « [...] des exigences en matière d'éclairage extérieur et d'éclairage intérieur rayonnant vers l'extérieur afin d'en limiter les effets nuisibles ou incommodes sur la sécurité, l'humain, la faune et la flore ainsi que la qualité du ciel étoilé. » (BNQ, 2016). Elle propose quatre zones d'éclairage nocturne (ZEN) : un niveau d'éclairage faible pour les zones de conservation et de protection du ciel étoilé et de l'environnement (ZEN-0)⁶, un niveau d'éclairage moyen ou élevé pour les zones résidentielles, commerciales et industrielles des municipalités de moins de 100 000 habitants (ZEN-1 et ZEN-2) et un niveau d'éclairage très élevé pour les municipalités de plus de 100 000 habitants (ZEN-3).

Le Tableau 5 présente les recommandations de la norme BNQ concernant l'éclairage public du réseau routier municipal⁷ de la ZEN-3 qui s'appliquent au territoire de la Ville de Montréal. La norme BNQ recommande de ne pas dépasser de plus de 30% les niveaux minimums de la norme RP-8-14 (en termes de luminance lors de la conception du projet et d'éclairage lors de la vérification du projet d'éclairage de rue). Elle recommande également de ne pas dépasser certaines quantités de flux lumineux (lumens) au-dessus de 80° et 90° des luminaires. Selon la norme BNQ, les meilleures pratiques (MP) pour la température de couleur consistent à utiliser des luminaires de rue à 1 800°K. Cependant, un compromis économique ou technique (CET) permet d'utiliser des luminaires de rue à 4 000 °K pour les zones mixtes (résidentielle, commerciale, etc.) et de type commercial (centre-ville, zone commerciale, zone industrielle, etc.). La norme BNQ indique qu'il n'a pas été possible d'obtenir un consensus de la part des membres du comité de normalisation quant au compromis économique ou technique concernant la température de couleur pour les zones résidentielles des municipalités de plus de 100 000 habitants. Enfin, la norme BNQ recommande de réduire l'intensité d'éclairage de 50% à partir de 23h00.

⁶ Soulignons que plusieurs municipalités de la région de la Réserve internationale de ciel étoilé du Mont-Mégantic ont adopté des règlements municipaux visant à réduire la pollution lumineuse autour de l'ASTROLab du parc national du Mont-Mégantic.

⁷ La norme BNQ présente également des recommandations pour les terrains de sport, pour les aires piétonnes (non contiguës à la chaussée d'une voie de circulation automobile) ou les parcs urbains et pour le réseau routier provincial qui ne sont pas présentées ici.

Tableau 5. Recommandations d'éclairage pour la zone ZEN-3 (municipalité de plus de 100 000 habitants)

Lieu	Réseau routier municipal (rues résidentielles, artères et grandes artères)
Niveau de luminance et d'éclairement	RP-8-14 + 30% ¹ ou autre réglementation en vigueur + 30%
Flux lumineux maximal par luminaire	Poteaux d'éclairage de ≥ 6 m : $> 90^\circ$: 20 lm Poteaux d'éclairage de < 6 m : $> 90^\circ$: 300 lm; $80^\circ - 90^\circ$: 800 lm Limiter les débordements de flux lumineux et éviter les nuisances et l'éblouissement
Température de couleur maximale	Grand parc : MP: 1 800 °K; CET : 2 200 °K
	Résidentiel : MP: 1 800 °K; CET : À défaut de consensus, aucune valeur CET n'est spécifiée
	Zone mixte (résidentielle, commerciale, etc.) et de type commercial (centre-ville, zone commerciale, zone industrielle, etc.) : MP : 1 800 °K; CET : 4 000 °K
Période d'éclairage	Recommandation: réduire l'intensité de 50% à partir de 23h00

¹ La luminance est utilisée lors de la conception et l'éclairement lors de la vérification sur le terrain. La norme BNQ recommande de ne pas dépasser de plus de 30% les niveaux minimums de la norme RP-8-14.

MP : Meilleure pratique

CET : Compromis économique ou technique

4. PROJET DE CONVERSION DE LUMINAIRES DE RUE DEL DE LA VILLE DE MONTRÉAL

4.1 Description du projet de conversion de luminaires de rue DEL de la Ville de Montréal

La Ville de Montréal prévoit remplacer les luminaires de quelques 110 000 lampadaires de rue sur son territoire, principalement des luminaires de rue HPS et des luminaires HM qui constituent environ 1% des luminaires de la Ville de Montréal, par des luminaires de rue DEL à 4 000°K. La plupart d'entre eux (80%) sont des luminaires de rue, installés sur des lampadaires dédiés ou des poteaux d'Hydro-Québec, et les autres sont des luminaires piétons (20%) (Figure 18).



Figure 18. Exemples de luminaires de rue (gauche) et de luminaires piétons sans vasque⁸ (droite)

Source : Ville de Montréal, 2016

Les nouveaux luminaires de rue DEL installés sur le territoire de la Ville de Montréal respecteront les exigences de la norme RP-8-14 (section 3)⁹. Le Tableau 6 présente quelques-unes des caractéristiques de ces luminaires de rue pertinentes à l'évaluation des risques décrite dans ce document (section 6).

⁸ Une vasque est un bassin de verre qui reflète la lumière.

⁹ Les exigences relatives aux luminaires de rue émises par les organismes suivants seront également respectées : *American National Standards Institute (ANSI)*, *American Society for Testing and Materials International (ASTM)*, *Energy Star*, *Canadian Standard Association (CSA et ULC)*, *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)*, *Municipal Solid-State Street Lighting Consortium (MSSLC)*, *European Union (EU)*, *International Dark-Sky Association (IDA)* et *FCC 47 CFR Part 15 Radio Frequency Devices* (Ville de Montréal, 2016).

Tableau 6. Quelques caractéristiques des luminaires de rue DEL de la Ville de Montréal

Caractéristique des luminaires DEL	Valeur
Efficacité lumineuse minimale	Luminaires de rue : 90 lm/W Luminaires piétons : 80 lm/W
Température de couleur	4 000°K
Indice de rendu de couleurs minimal	80
Distribution spectrale	Minimiser l'émission des longueurs d'onde situées entre 450 et 490 nm
Valeur du <i>Uplight</i>	U0 : 0 lumen vers le ciel
Type de défilement	Défilement absolu (<i>Full cutoff</i>)
Approbation IDA ciel noir (défilement absolu)	Oui

Source : Ville de Montréal, 2016

Les luminaires de rue DEL comportent plusieurs avantages comparativement aux autres types de luminaires : allumage instantané (ce qui peut être avantageux pour des applications spécifiques comme les lieux de passage), grande efficacité énergétique qui entraîne une faible consommation énergétique, longue durée de vie potentielle des DEL, réduction des coûts de remplacements fréquents des lampes, absence de mercure et d'autres matériaux polluants, et possibilité de faire la gestion de l'éclairage par le biais de systèmes de contrôle intelligent (Laperrière, 2011; ADEME, 2014). La Ville de Montréal, 2016 considère également que les luminaires de rue offrent une meilleure visibilité, un meilleur rendu des couleurs et une meilleure uniformité de l'éclairage. Elle considère que les luminaires de rue DEL à 4 000°K choisis permettront de diriger la lumière aux bons endroits et de diminuer la pollution lumineuse.

Quelques projets pilotes d'installation de nouveaux luminaires de rue DEL à 4 000°K ont déjà eu lieu dans certains secteurs du territoire de la Ville de Montréal, comme au centre-ville (rues de La Gauchetière, Peel et Notre-Dame) et dans l'arrondissement St-Laurent (rues Cavendish, Alexis-Nihon et Toupin)¹⁰.

Dans le cadre du projet de conversion aux luminaires DEL, la Ville de Montréal a élaboré différents scénarios d'installation de luminaires de rue DEL en fonction de l'éclairage nécessaire (lux) selon le type de rues (résidentielle, artère, grande artère). L'Annexe 2 présente quatre de ces scénarios, à titre d'exemples. En tout, les nouveaux luminaires DEL auront une puissance variant d'environ 35 W à 132 W¹¹. Certaines données de ces scénarios seront utilisées à la section 6 afin d'estimer l'exposition de la population.

4.2 Description des luminaires DEL installés le long des pistes cyclables de l'Île-des-Sœurs

En 2015, l'arrondissement de Verdun a installé quelque 75 nouveaux luminaires DEL de type piéton sur certaines de ses pistes cyclables (lignes rouges à la Figure 19). Les principales caractéristiques de ces luminaires sont présentées au Tableau 7 (Arrondissement de Verdun, 2015).

¹⁰ Il faut cependant souligner que, puisque le système de gestion à distance de l'éclairage de rue n'est pas encore en fonction à l'heure actuelle, les résidents de ces secteurs ne sont pas en mesure de constater le résultat final de ces projets pilotes (section 4.3).

¹¹ Les luminaires de rue à 132 W sont prévus principalement sur les grandes artères (centre-ville, rue Notre-Dame, rue Sherbrooke, etc.).

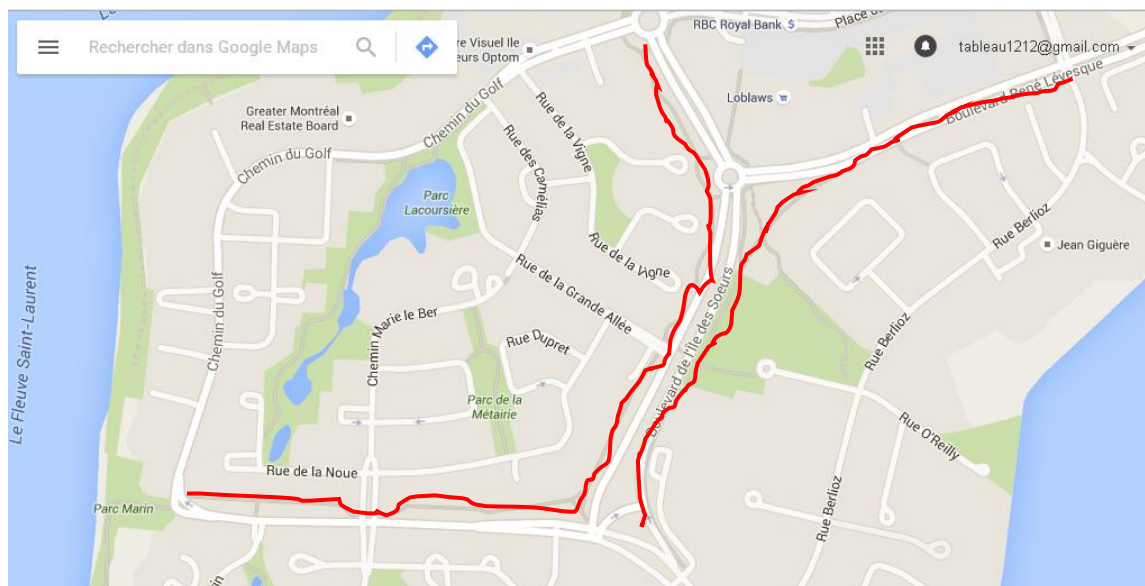


Figure 19. Portions de pistes cyclables (lignes rouges) de l'Île-des-Sœurs éclairées par des luminaires DEL

Source : Arrondissement de Verdun, 2015

Tableau 7. Caractéristiques des luminaires DEL installés le long des pistes cyclables de l'Île-des-Sœurs

Caractéristiques des luminaires DEL	Valeur	
Hauteur des fûts	14 pieds	
Type de luminaires	Avec vasque	
Nombre de lumières	48 DEL blanches	
Température de couleur	4 000 °K	
Indice de rendu des couleurs	70	
Puissance de la lampe	55 W	
Flux lumineux moyen	4 547,9 lm	
Efficacité du luminaire	84,5 lm/W	
BUG rating	B1 U3 G1	
Distribution spectrale	Type III <i>short</i>	
Approbation IDA ciel noir (défilement absolu)	Non	

Source : Arrondissement de Verdun, 2015

Dès le début de l'installation de ces luminaires DEL à 4 000°K le long des pistes cyclables, certains citoyens ont émis des plaintes relativement à l'éblouissement et à l'intrusion de la lumière à l'intérieur de leur résidence. Une pétition a été signée par plusieurs citoyens habitant le long de ces pistes cyclables. Les luminaires de l'Île-des-Sœurs comportent des vasques et présentent un *Uplight* de U3; ils diffèrent des luminaires sans vasque et ayant un *Uplight* de U0 exigés par la Ville de Montréal.

La DRSP de Montréal ne possède pas l'expertise pour évaluer ces luminaires d'un point de vue technique. Toutefois, des mesures d'éclairement vertical à l'œil (lux) réalisées par la DRSP, 2016 le long de la piste cyclable indiquent que les niveaux varient de 3 lux (loin des luminaires) jusqu'à environ 30 lux (à 1 ou 2 m du luminaire) ce qui est très éclairant. La DRSP de Montréal considère que ces luminaires ne présentent pas un risque pour la santé des citoyens de l'Île-des-Sœurs. Cependant, tel qu'indiqué à la section 7, il serait

souhaitable que l'Arrondissement de Verdun vérifie s'il y aurait lieu de réduire le niveau d'éclairage de ces luminaires et si certains ajustements permettraient d'éviter des problèmes de lumière intrusive dans les résidences.

4.3 Système de gestion à distance de l'éclairage de rue DEL

La Ville de Montréal installera un système de gestion à distance afin de contrôler les luminaires de rue DEL. Ce système permettra, entre autres, de réduire l'intensité de chaque luminaire selon les besoins¹² et d'identifier rapidement les luminaires en panne. L'utilisation d'un système de gestion à distance apparaît donc un outil intéressant en éclairage de rue DEL.

Ce système de gestion à distance comprend des dispositifs installés sur chaque luminaire qui sont reliés à des contrôleurs installés à 6 m de hauteur sur certains poteaux (dont les poteaux d'Hydro-Québec). Ces contrôleurs sont composés d'un boîtier et d'une antenne radiofréquences (RF). Trois modèles de contrôleurs différents, possédant sensiblement les mêmes caractéristiques, devraient être utilisés sur le territoire de la Ville de Montréal. Un de ces contrôleurs a été évalué par Zubek, 2016 afin d'estimer l'exposition potentielle de la population aux RF émis par ces équipements et de s'assurer du respect des normes du Code de sécurité 6 de Santé Canada en matière d'exposition aux RF (Santé Canada, 2015). L'Annexe 3 présente un résumé des niveaux d'exposition aux RF estimés.

Zubek, 2016 conclut que l'exposition de la population générale au niveau du sol et même à 10 cm de l'antenne du contrôleur respectent la norme du Code de sécurité 6. Le seul endroit où la densité de puissance dépasserait la limite permise du Code de sécurité 6 est limité à l'antenne elle-même. Dans son rapport, Zubek, 2016 recommande aux travailleurs d'éviter tout contact physique avec ces antennes en fonction et de maintenir une distance de 20 cm autour de celles-ci.

4.4 Quelques projets de conversion aux luminaires de rue DEL au Québec et ailleurs dans le monde

Montréal n'est pas la première ville à se tourner vers les luminaires de rue DEL. De nombreuses municipalités québécoises procèdent actuellement au remplacement de leurs luminaires de rue pour la technologie DEL à des températures de couleur avoisinant 4 000°K.

Afin de protéger le ciel étoilé de l'ASTROLab du parc national du Mont-Mégantic, plusieurs municipalités de la grande région du Mont-Mégantic ont choisi de remplacer leurs anciens luminaires de rue par des luminaires conçus de manière à réduire l'émission de lumière vers le ciel, à contrôler ou à éteindre l'éclairage artificiel extérieur lorsque non nécessaire et à minimiser l'énergie contenue dans la zone de bleu (Laperrière, 2014).

Dans le reste de l'Amérique du Nord et en Europe, on compte également un grand nombre de municipalités qui convertissent leurs luminaires de rue à la technologie DEL : Ottawa, New-York, Cambridge, Los Angeles, Pittsburg, Londres, Zurich, etc., pour ne nommer que celles-ci.

¹² En effet, compte tenu de la perte d'environ 30% de l'intensité lumineuse au cours de la vie du luminaire DEL, des luminaires un peu plus puissants que nécessaire sont choisis et leur intensité est alors réduite d'environ 30% dès leur installation afin de conserver un éclairage constant durant toute la vie des luminaires. Dans certains secteurs, l'intensité du luminaire DEL sera abaissée à nouveau durant la nuit.

5. LUMIÈRE LA NUIT ET SANTÉ

La section 5 présente d'abord un résumé des effets de l'exposition à la lumière la nuit sur la santé. Afin d'expliquer le risque possible pour la santé associé à la lumière, une brève description des rythmes circadiens et du rôle de la mélatonine sont respectivement présentées aux sections 5.1 et 5.2. La section 5.3 présente une revue systématique de la littérature scientifique concernant les impacts sur le cancer du sein (section 5.3.1), les syndromes métaboliques (section 5.3.2) et les autres effets sur la santé (section 5.3.3). Finalement, une description plus approfondie des différentes études peut être consultée à l'Annexe 4. Un résumé des caractéristiques, du contrôle des variables de confusion, des biais et de la qualité des études réalisées dans la population générale est présenté au Tableau 8 à la fin de section 5.3.3.

Résumé

La lumière est le principal régulateur des rythmes circadiens et la sécrétion de la mélatonine est fréquemment utilisée comme indicateur de ces rythmes. La lumière inhibe la sécrétion de la mélatonine. Pour évaluer l'impact de l'exposition lumineuse sur la sécrétion de la mélatonine, plusieurs facteurs doivent être considérés, soit : le niveau d'éclairement, la composition spectrale de la lumière (c.-à-d. lumière bleue), la durée d'exposition, le moment d'exposition, l'exposition lumineuse antérieure et les caractéristiques physiologiques des individus exposés. La difficulté d'évaluer simultanément l'ensemble de ces facteurs et de tenir compte de leurs interactions, fait en sorte que la détermination d'un seuil d'éclairement sous lequel la lumière n'aurait pas d'effet sur la sécrétion de la mélatonine est impossible dans l'état actuel des connaissances scientifiques.

Un effet oncostatique¹³ de la mélatonine a été démontré en culture cellulaire et par l'utilisation de rongeurs. Néanmoins, à ce jour, aucune des études répertoriées n'a démontré un effet néfaste lié directement à l'inhibition de la mélatonine, y compris le cancer. Étant donné que l'inhibition de la mélatonine correspond à un effet physiologique d'adaptation du corps, un dérèglement transitoire et sur une courte période de temps n'engendre pas le même effet qu'une perturbation chronique des rythmes circadiens.

Il n'existe, pour l'instant, aucune étude évaluant l'effet de la lumière émise par les luminaires de rue sur la santé. Chez l'humain, la majorité des études examinant le lien entre la lumière la nuit (intérieur ou extérieur) et la santé portent sur le travail par quarts¹⁴. Ces horaires de travail sont associés à un risque accru de développer le cancer du sein ou des syndromes métaboliques. Néanmoins, l'exposition à la lumière durant la nuit n'est pas la seule explication possible pouvant sous-tendre les associations observées chez ces travailleurs (habitudes de vies, période de sommeil, etc.). De plus, l'exposition à la lumière la nuit chez les travailleurs par quarts est de loin supérieure à celle de la population générale tant en termes d'intensité que de durée de l'exposition.

Les études menées auprès de la population générale présentent pour la plupart un devis de type écologique et utilisent les images satellitaires pour estimer l'exposition à la lumière la nuit. Les biais intrinsèques associés

¹³ Qui freine le développement des tumeurs.

¹⁴ Dans la littérature scientifique, la définition du travail par quarts n'est pas toujours précisée et peut varier. Selon les auteurs, les éléments retrouvés sont: un mode d'organisation du travail différent du mode habituel, dans lequel les travailleurs se succèdent en rotation afin de prolonger les heures de travail en dehors des heures normales et dans lequel le travail peut être accompli à des heures différentes selon une période donnée. Le travail par quarts peut aussi signifier un horaire de travail inhabituel, irrégulier, flexible, variable ou atypique, et impliquer le travail de nuit (IARC, 2010).

à ces études ne permettent pas d'établir un lien de cause à effet entre la lumière la nuit et la santé. Finalement, le peu d'études ayant recours à des données individuelles présentent des résultats contradictoires. Néanmoins, lorsqu'elles sont contrôlées pour les facteurs de confusion importants, la quasi-totalité de ces études ne présentent pas d'association entre l'exposition à la lumière la nuit à l'intérieur et la santé.

Bref, l'état actuel des connaissances ne nous permet pas de conclure sur une relation de causalité entre l'exposition à la lumière la nuit (intérieur ou extérieur) et un effet néfaste sur la santé. Tant qu'il n'aura pas été établi de façon raisonnable que l'exposition à la lumière la nuit est nuisible pour la santé, il est déraisonnable d'inférer un effet néfaste aux luminaires de rue.

5.1 Rythmes circadiens

Les mammifères suivent des rythmes internes qui sont modulés par les variations quotidiennes de lumière et d'obscurité : ce sont les rythmes circadiens. Les rythmes circadiens consistent en des événements biologiques caractérisés par un cycle d'environ 24 heures (Figure 20). Dans le corps humain, on retrouve plusieurs rythmes circadiens tels que la température corporelle, la sécrétion d'hormones (ex. mélatonine, insuline, etc.), le cycle de veille/sommeil, le rythme cardiaque, la soif, la faim, etc. Plusieurs études ont montré qu'isolé de lumière et de tout repère temporel, l'humain aurait un cycle naturel se situant entre 24,2 et 25,5 heures selon les individus. La lumière permet alors de synchroniser ce cycle naturel en un cycle de 24 heures (Czeisler et coll., 1999; Martinsons et Zissis, 2014).

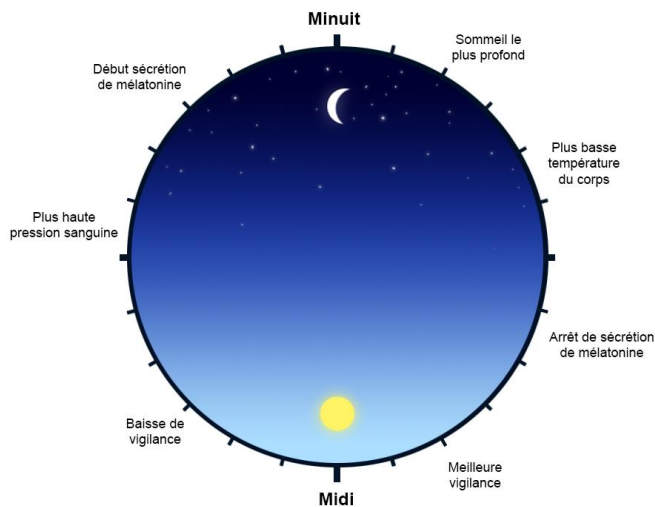


Figure 20. Exemple de rythmes circadiens

Source : Adapté de Centre de recherche de l'Hôpital Douglas, 2013

Lorsque la lumière entre dans l'œil, elle stimule les cellules ganglionnaires situées dans la rétine qui sont reliées par le nerf optique aux noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus (Figure 21). Ces noyaux constituent l'horloge biologique centrale qui coordonne les activités des horloges périphériques (ex. cycle veille/sommeil, rythme cardiaque, température corporelle, etc.) (Martinsons et Zissis, 2014). Bien que les

horloges périphériques répondent aux stimulations de l'horloge centrale, qui est principalement régie par les stimuli lumineux, elles peuvent également être dépendantes d'autres facteurs environnementaux (ex. les cycles d'ingestion de nourriture) (Challet, 2015).

Les cellules ganglionnaires contiennent un photopigment, la mélanopsine, qui possède une plus grande sensibilité à la lumière bleue (Thapan et coll., 2001; Berson et coll., 2002; Brainard et Hanifin, 2005; Foster et Hankins, 2007). L'excitation de ces cellules influencera grandement la production de la mélatonine.

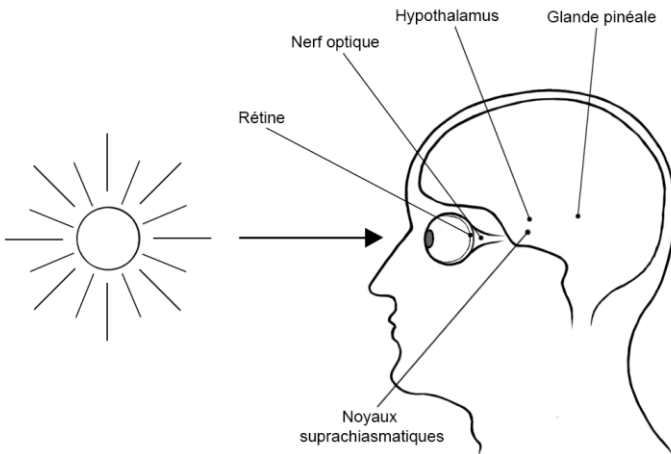


Figure 21 : Voie rétinohypothalamique stimulée par la lumière

5.2 Mélatonine, un indicateur des effets de la lumière sur les rythmes circadiens

5.2.1 Rôles de la mélatonine

La mélatonine est une hormone produite par la glande pinéale située au centre du cerveau et est souvent appelée « hormone du sommeil ». Durant la journée, la lumière inhibe la sécrétion de la mélatonine, par l'excitation de la mélanopsine présente dans les cellules ganglionnaires photosensibles. Normalement, la sécrétion de la mélatonine débute en fin de soirée et atteint son apogée au milieu de la nuit (Figure 22) (Arendt, 1998).

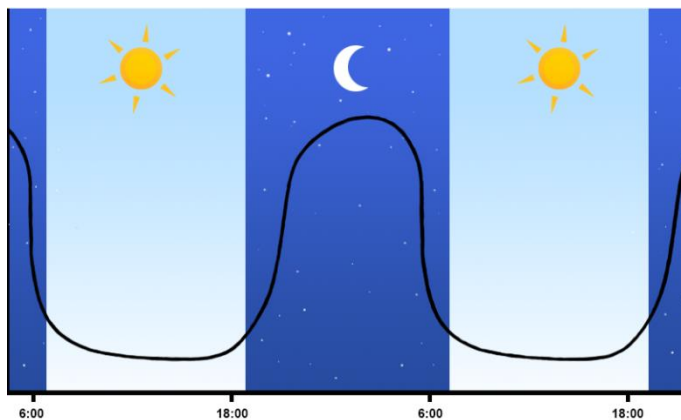


Figure 22. Variation des niveaux de la mélatonine durant la journée

Source : Adapté de The Paleo mom, 2015

L'exposition à la lumière le soir peut retarder la production de mélatonine, et avoir un effet sur l'endormissement, tandis qu'une exposition lumineuse le matin peut devancer l'inhibition de la sécrétion de la mélatonine, et avancer l'horloge circadienne. Ce phénomène permet, entre autres, de s'adapter aux changements d'heure et aux décalages horaires. La mélatonine stabilise les rythmes circadiens en fonction de l'alternance journalière et saisonnière de l'exposition lumineuse. La mélatonine est également reconnue pour son action favorable sur le système immunitaire et son effet oncostatique¹⁵ chez les animaux (Haim et Zubidat, 2015).

5.2.2 Influence de la lumière sur la sécrétion de la mélatonine

Plusieurs études expérimentales menées chez l'humain ont cherché à mieux comprendre l'effet de l'exposition à la lumière durant la nuit sur la sécrétion de la mélatonine. Les devis de ces études sont assez similaires. Les sujets se présentent en laboratoire où leur exposition lumineuse est contrôlée. L'effet de la lumière sur la mélatonine est mesuré par l'intermédiaire d'échantillons de salive, de sang et rarement à l'aide d'un métabolite urinaire. Dans la plupart des études, les sujets sont exposés au préalable à une nuit de contrôle où des échantillons biologiques sont prélevés dans des conditions considérées comme étant de faible intensité lumineuse par les auteurs. Ces prélèvements permettent de visualiser l'évolution normale des concentrations de la mélatonine chez les sujets. Lors des nuits d'expérimentation subséquentes, les sujets sont exposés à un stimulus lumineux qui peut varier en termes d'intensité lumineuse, de composition spectrale, de durée et du moment d'exposition. Certains auteurs ont également recours à l'usage de composés chimiques afin d'assurer une dilatation continue des pupilles lors de l'exposition. Bien que plusieurs de ces études expérimentales soient caractérisées par de petits effectifs (<15 sujets), quelques-unes possèdent des effectifs de taille modérée (>30 sujets). De façon générale, les participants de ces études sont de jeunes adultes en bonne santé. Seules quelques études ont exploré les effets de la lumière chez les personnes âgées ou chez les enfants (Kozaki et coll., 2015; Kim et coll., 2014; Chang et coll., 2012; Casper et Rahman; Kripke et coll., 2007; Dewan et coll., 2011; Lewy et coll., 1980; Czeisler et coll., 1986; McIntyre et coll., 1989; Aoki et coll., 1998; Benloucif et coll., 2006; Duffy et coll., 2007; Brainard et coll., 2008; Sletten et coll., 2009; Smith et Eastman, 2009; Gooley et coll., 2010; Brainard et coll., 2015; Vartanian et coll., 2015; Kozaki et coll., 2016; Brainard et coll., 2001; Zeitzer et coll., 2000; Thapan et coll., 2001; Jasser et coll., 2006; Lucas et coll., 2014 West et coll., 2011).

Les résultats de l'ensemble de ces études ont permis d'identifier six facteurs indépendants qui influencent l'inhibition de la sécrétion de la mélatonine : le niveau d'éclairement, la composition spectrale de la lumière, la durée de l'exposition à la lumière, le moment de l'exposition à la lumière, l'exposition lumineuse antérieure (durant la journée) et les caractéristiques physiologiques des individus exposés à la lumière. La considération de l'ensemble de ces facteurs est nécessaire afin d'interpréter les résultats des études mesurant les effets de la lumière sur la mélatonine.

Niveau d'éclairement

L'éclairement est associé de façon positive à l'inhibition de la mélatonine. En effet, plus l'éclairement reçu est élevé, plus l'inhibition de la mélatonine est grande. Néanmoins, cette relation n'apparaît pas comme ayant une forme linéaire, mais plutôt logistique (Figure 23) (Zeitzer et coll., 2000; Brainard et coll., 2015). Ceci semble indiquer qu'il pourrait exister un seuil d'éclairement sous lequel la lumière n'aurait pas d'effet sur la sécrétion de la mélatonine. Mais ce niveau d'éclairement lumineux n'induisant pas d'effet varie grandement dans les études consultées. Par exemple, certains auteurs proposent des niveaux aussi bas que 1 lux (Lucas et

¹⁵ Qui freine le développement des tumeurs.

coll., 2014) alors que d'autres soutiennent qu'une exposition beaucoup plus élevée, soit 30 lux de lumière à l'œil pendant 30 minutes, serait nécessaire pour inhiber la synthèse de la mélatonine (Rea et Figueiro, 2016; Zeitzer et coll., 2000; Jasser et coll., 2006). Ces différences pourraient être dues, en grande partie, au fait que ces études ne sont pas contrôlées pour les facteurs abordés subséquemment qui influencent l'effet de l'éclairement lumineux sur la sécrétion de la mélatonine.

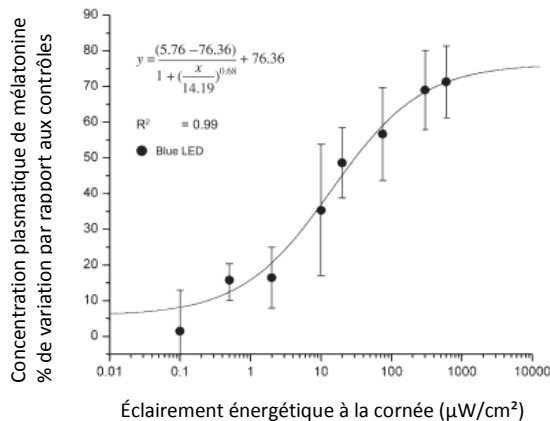


Figure 23. Relation entre l'éclairement à l'œil et la concentration plasmatique de la mélatonine

Source : Adapté de West et coll., 2011

Composition spectrale de la lumière

La composition spectrale de la lumière est également un élément important lors de l'estimation de son effet sur la suppression de la mélatonine. En effet, plusieurs études ont observé que la lumière située dans des longueurs d'onde bleutées induit une inhibition de la sécrétion de la mélatonine plus importante que les autres longueurs d'onde (Thapan et coll., 2001; Brainard et coll., 2008; Gooley et coll., 2010; West et coll., 2011; Brainard et coll., 2015). Ainsi, la lumière située dans les longueurs d'onde de 420 à 600 nm peut inhiber la sécrétion de la mélatonine, et cette inhibition est plus marquée entre 446 et 477 nm (Rea et coll., 2011). Des courbes de sensibilité de la mélatonine aux différentes longueurs d'onde ont été suggérées pour l'être humain (Thapan et coll., 2001; Brainard et coll., 2001; DIN V 5031-100:2009-06, 2009; Lucas et coll., 2014). Selon Rea et coll., 2011, une exposition à une lumière monochromatique à environ 460 nm pourrait avoir un effet sur la suppression de la mélatonine environ deux fois plus élevé qu'à 520 nm pour un même éclairement.

La Figure 24 présente la courbe de sensibilité de la mélatonine de la norme DIN V 5031-100:2009-06, 2009 établie à partir des mesures de Brainard et coll., 2001 et de Thapan et coll., 2001. Cette courbe s'étendant de 380 à 580 nm sera utilisée dans la section 6 afin de caractériser l'action de la lumière bleue sur la mélatonine. Plusieurs auteurs ont d'ailleurs déjà tenté de transformer les puissances ou les éclairements en indices mélanopiques, en biolux ou en lux mélanopiques qui correspondraient à l'effet pondéré de cette lumière sur l'inhibition de la sécrétion de la mélatonine (Lucas et coll., 2014; Oh et coll., 2015; Roby et coll., 2016).

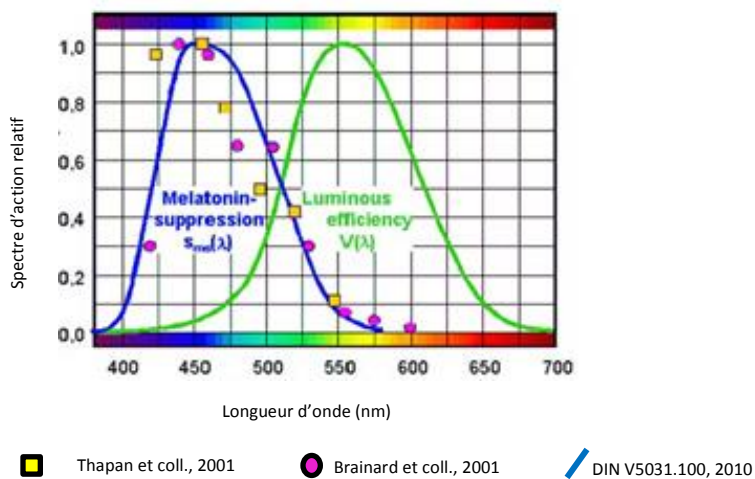


Figure 24. Courbe de sensibilité de la mélatonine aux différentes longueurs d'onde (courbe bleue à gauche)
 Source : Adapté de DIN V 5031-100:2009-06, 2009

Durée d'exposition

La durée de l'exposition au stimulus lumineux est également importante. Plus l'exposition à la lumière est prolongée, plus l'inhibition de la sécrétion de la mélatonine est élevée. Néanmoins, il semblerait que cet effet ne soit pas parfaitement proportionnel et que les premières minutes d'exposition engendrent une inhibition plus importante que l'exposition subséquente (Figueiro et coll., 2006). Aucune des études répertoriées n'a examiné d'effets de la lumière sur la sécrétion de la mélatonine pour les expositions inférieures à 12 minutes.

Moment de l'exposition à la lumière

Le moment de l'exposition à la lumière est également un facteur décisif afin de déterminer l'effet associé à l'exposition. L'humain est plus sensible à l'exposition durant la nuit. Une exposition au début de la nuit peut entraîner un délai dans la sécrétion de la mélatonine (Chang et coll., 2012; Dewan et coll., 2011; Benloucif et coll., 2006). Inversement, une exposition en début de journée provoque une avance dans la sécrétion de la mélatonine (Boivin et James, 2002).

Exposition antérieure à la lumière

L'exposition antérieure à la lumière constitue aussi un élément influençant l'inhibition de la mélatonine lors d'une exposition à la lumière durant la nuit. En effet, les individus ayant une exposition faible à la lumière durant la journée seront plus sensibles à la suppression de la mélatonine durant la nuit (Chang et coll., 2012; Boivin et James, 2002; Hébert et coll., 2002; Smith et coll., 2004; Rufiange et coll., 2007).

Caractéristiques physiologiques

Il existe également une variation biologique naturelle dans l'inhibition de la mélatonine par l'exposition lumineuse. Différents auteurs ont noté une importante variation interindividuelle du profil de sécrétion de la mélatonine ainsi que de la réponse aux stimuli lumineux (Hébert et coll., 2002; Smith et coll., 2004; Rufiange et coll., 2007). Cette variation est basée sur plusieurs composantes connues et inconnues à ce jour. L'une des composantes connues est l'âge. Le taux de transmission de la lumière par le cristallin (en particulier pour les courtes longueurs d'onde) tend à diminuer avec l'âge (Rea et Ouellette, 1991; Higuchi et coll., 2014). Il est aussi important de préciser que lorsque les paupières sont closes, une très grande proportion de l'éclairement lumineux est filtrée par ces dernières, en particulier la lumière bleue (Figueiro et coll., 2004). L'exposition de la rétine à la lumière bleue durant le sommeil est donc minime.

Conclusion

En conclusion, bien qu'il soit à ce stade impossible d'identifier un niveau d'exposition à la lumière n'engendrant pas d'effets physiologiques, il est important de souligner que cela ne signifie pas que toute exposition à la lumière la nuit provoque un effet néfaste sur la santé. De plus, l'inhibition de la mélatonine est un effet physiologique, comme la dilatation des pupilles ou la pression artérielle, qui indique une réaction d'adaptation du corps et non un effet néfaste pour la santé. L'inhibition de la mélatonine sera utilisée à la section 6.2.3 (puissance de lumière bleue pondérée).

5.3 Effets de la lumière sur la santé

Depuis l'annonce de la conversion des luminaires de rue DEL à Montréal, des messages laissent entendre que l'exposition aux luminaires de rue la nuit pourrait induire un grand nombre de cancers du sein, de maladies cardiovasculaires, de diabète, de dépression ainsi que de cancers colorectaux et de la prostate. Néanmoins, à ce jour, aucune étude n'a été réalisée pour permettre de relier l'éclairage de rue DEL et un quelconque effet sur la santé.

Afin de contextualiser l'origine de ces propos, nous avons fait une revue de la littérature plus large, portant sur l'exposition à la lumière la nuit (travail par quarts¹⁶, éclairage intérieur et éclairage extérieur) et les effets sur la santé (entre autres les cancers et les syndromes métaboliques). Cette revue a pour but d'évaluer si la littérature disponible permet de démontrer un lien causal entre l'exposition à la lumière la nuit et la santé pour la population générale. Le lecteur trouvera donc, ci-après, une brève analyse critique de la littérature scientifique disponible pour le cancer du sein et les syndromes métaboliques. Il s'agit des problèmes de santé pour lesquels on dispose d'une littérature scientifique suffisante pour permettre d'examiner la présence d'une relation causale avec l'exposition à la lumière la nuit. Les conclusions de la littérature scientifique chez les animaux, les travailleurs ainsi que la population générale pour ces deux problèmes de santé sont abordées aux sections 5.3.1 et 5.3.2. Le Tableau 8 résume les caractéristiques, le contrôle des variables de confusion, les biais et la qualité des études réalisées spécifiquement dans la population générale. La méthodologie utilisée et une revue systématique plus détaillée de la littérature scientifique sont présentées à l'Annexe 4.

¹⁶ Dans la littérature scientifique, la définition du travail par quarts n'est pas toujours précisée et peut varier. Selon les auteurs, les éléments retrouvés sont: un mode d'organisation du travail différent du mode habituel, dans lequel les travailleurs se succèdent en rotation afin de prolonger les heures de travail en dehors des heures normales et dans lequel le travail peut être accompli à des heures différentes selon une période donnée. Le travail par quarts peut aussi signifier un horaire de travail inhabituel, irrégulier, flexible, variable ou atypique, et implique le travail de nuit (IARC, 2010).

5.3.1 Cancer du sein

En 2007, le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) de l'Organisation Mondiale de la Santé a classé le travail par quarts impliquant une perturbation des rythmes circadiens comme cancérigène probable pour l'humain (groupe 2A) en raison des preuves issues des études animales suffisantes et des preuves tirées des études épidémiologiques chez l'humain insuffisantes¹⁷.

Cancer du sein - Études animales

Les études animales consultées se divisent sommairement en deux grandes catégories. La première catégorie d'études animales évalue la survenue de tumeurs en lien avec l'exposition lumineuse. À partir des années 1960, plusieurs études ont permis d'observer une augmentation de l'incidence des tumeurs cancéreuses lorsque des rongeurs étaient exposés à un environnement lumineux constant (24 heures de lumière) par rapport à un environnement alternant la lumière et l'obscurité (12 heures de lumière et 12 heures d'obscurité) (Anisimov et coll., 2004; Popovich et coll., 2013). Ces études indiquent que l'absence totale d'exposition à l'obscurité induit une augmentation de cancers. Des études similaires indiquent un développement plus précoce des tumeurs chez les rongeurs dont l'exposition lumineuse simule le travail par quarts (rotation du moment de l'éclairement lumineux) (Van Dycke et coll., 2015).

La deuxième catégorie d'études animales fréquemment réalisées est celle qui expose des rongeurs xénogreffés de cellules cancéreuses humaines à différentes conditions lumineuses. Ces études montrent que la réduction ou l'absence de mélatonine plasmatique, associée à une exposition lumineuse, permet une croissance plus rapide des cellules cancéreuses de la xénogreffe (Blask et coll., 2005; Blask et coll., 2014).

Malgré que les études animales supportent un lien entre une exposition chronique à la lumière et l'incidence ou la croissance de tumeurs, et que l'effet oncostatique de la mélatonine ait été démontré (Blask et coll., 2005), certains bémols doivent être mentionnés avant d'extrapoler ces résultats à l'humain. En premier lieu, la physiologie circadienne des rongeurs est plus sensible aux stimuli lumineux que celle des humains. En effet, le niveau d'éclairement requis pour induire une suppression de mélatonine serait entre 3 000 et 10 000 fois plus bas que celui requis chez les humains (Bullough et coll., 2006). En second lieu, l'exposition lumineuse utilisée dans les études animales n'est pas comparable à l'exposition chez l'humain qui est exposé à des niveaux d'éclairement beaucoup plus faibles et de plus courte durée. Pour ces raisons, il est primordial de valider les résultats provenant des études animales par des études épidémiologiques présentant des devis expérimentaux solides.

Cancer du sein - Études chez l'humain – Travailleurs

Relativement peu d'études épidémiologiques ont été réalisées de façon à évaluer spécifiquement le lien entre l'exposition à la lumière la nuit et le cancer du sein. La plupart des études épidémiologiques réalisées en ce sens portent sur le travail par quarts.

Depuis les cinq dernières années, plusieurs méta-analyses sont parues à ce sujet (Akinyemiju et coll., 2015; Ijaz et coll., 2013; Jia et coll., 2013; Kamdar et coll., 2013; Wang et coll., 2013; He et coll., 2015; Travis et coll., 2016). La plupart des méta-analyses corroborent la présence d'un lien entre le travail par quarts et le cancer du sein. Néanmoins, les estimés de risque compilés dans les méta-analyses, pour les études où le devis permettait d'assurer que l'exposition au travail par quarts était antérieure à la survenue du cancer du sein,

¹⁷ On retrouve également dans le groupe 2A des produits chimiques comme le pesticide diazinon ainsi que la consommation de viande rouge et la profession de coiffeur/coiffeuse.

sont plus faibles et souvent statistiquement non significatifs (Jia et coll., 2013; Wang et coll., 2013; He et coll., 2015; Travis et coll., 2016). Dans tous les cas, le risque de cancer du sein en lien au travail par quarts serait relativement faible (un risque excédentaire de 3% à 5% pour chaque tranche de 5 ans de travail par quarts) (Ijaz et coll., 2013; Wang et coll., 2013).

De plus, il convient de rappeler que le cancer du sein est une maladie multifactorielle pour laquelle certains facteurs de risque ont été identifiés et d'autres sont considérés comme possibles. Différentes équipes de recherche ont identifié les facteurs de risques suivants : intervalle long entre les premières menstruations et la première grossesse (Liu et coll., 2016), absence ou courte durée de l'allaitement (Collaborative Group on Hormonal Factors in Breast Cancer, 2002), prise d'hormones telles que l'œstrogène ou la progestérone (Chlebowski et coll., 2003), obésité après la ménopause (IARC, 2014), pratique insuffisante de l'activité physique (Thune et coll., 1997), hérédité (mutations génétiques) (Ellisen et Haber, 1998) et consommation d'alcool (Hamajima et coll., 2002) ou de tabac (Macacu et coll., 2015). Le travail par quarts pourrait constituer un facteur de risque supplémentaire.

Finalement, bien qu'il soit possible que le travail par quarts puisse augmenter le risque de cancer du sein, il est important de souligner que d'autres facteurs, dont la perturbation de l'horaire de sommeil, pourraient être responsable du dérèglement des rythmes circadiens. De surcroît, l'exposition à la lumière d'un travailleur durant son quart de travail (quelques centaines de lux à l'œil) n'est pas comparable à celle issue des luminaires de rue.

Cancer du sein - Études chez l'humain – Population générale

Aucune étude répertoriée n'évalue l'impact de la lumière de rue sur la santé de la population. Deux types d'études seront cependant discutées, la première évaluant la lumière mesurée par des images satellitaires et la seconde discutant de l'impact de la lumière à l'intérieur de la chambre à coucher. Ces études comportent cependant de nombreux biais (Tableau 8).

Images satellitaires

Les études portant sur le cancer du sein en lien avec l'exposition issue d'images satellitaires présentent, en majorité, un devis de type écologique¹⁸. Elles examinent l'association entre l'exposition moyenne à la lumière de différentes régions géographiques et les taux de cancers du sein de ces régions.

Parmi les études écologiques répertoriées, deux études examinent l'association entre le cancer du sein et la lumière la nuit à l'échelle nationale (Kloog et coll., 2010; Rybnikova et coll., 2015) tandis que quatre autres études le font à une échelle infranationale (secteurs de recensement et régions métropolitaines) (Kloog et coll., 2008; Kim et coll., 2015; Portnov et coll., 2016; Kim et coll., 2016). Dans l'ensemble, ces études identifient une association entre la moyenne annuelle de lumière reflétée vers le ciel dans une région et le taux de cancer de cette région. De par leur devis, ces études sont sujettes à un biais écologique¹⁹. Ce biais est d'ailleurs reconnu par les auteurs des articles suivants (Kloog et coll., 2008; Kim et coll., 2015; Portnov et coll., 2016; Kim et coll., 2016) comme empêchant la démonstration d'un lien causal entre la lumière la nuit et le cancer du sein.

¹⁸ Une étude écologique est une étude épidémiologique qui étudie les associations entre une exposition et un effet, à partir de données populationnelles agrégées. Il n'y a donc aucune information recueillie directement auprès des individus.

¹⁹ C'est-à-dire une association observée à une certaine échelle (ex. pays ou villes), mais qui ne correspond pas à l'association observée au niveau individuel (Rothman et coll., 2008).

Seules deux études utilisant les images satellitaires comme indicateur de l'exposition à la lumière la nuit ont évalué le développement du cancer au niveau individuel. L'étude de Bauer et coll., 2013, conduite dans l'état de Géorgie aux États-Unis, démontre un risque statistiquement significatif de cancer du sein lorsque le groupe le moins exposé est comparé au groupe le plus exposé à la lumière, mais n'observe aucune association lorsque le groupe le moins exposé est comparé au groupe d'exposition médiane. Les associations présentées dans cette étude rétrospective semblent également varier en fonction de l'ethnicité puisqu'elles ne persistent que chez les Caucasiens. L'étude de Hurley et coll., 2014 menée en Californie, a démontré une augmentation non statistiquement significative du risque de cancer du sein pour le groupe vivant dans le secteur où le niveau de lumière extérieure était le plus élevé, en comparaison avec le groupe vivant dans le secteur où la lumière extérieure présentait le niveau le plus faible. Dans les deux cas, une association significative n'a été démontré qu'en comparant les groupes les plus exposés aux groupes les moins exposés.

L'utilisation d'images satellitaires pour décrire l'exposition à la lumière la nuit présente des limites quant aux conclusions qu'il est possible d'en tirer. Ces images captent la lumière provenant de la Terre et qui est reflétée vers le ciel, et non l'exposition réelle des individus. De surcroît, les associations présentées par ces études ne prennent pas en considération l'exposition des sujets à l'intérieur de leur résidence. Étant donné que l'exposition intérieure durant la soirée est normalement plus élevée que l'exposition extérieure en termes d'intensité et de durée (section 6), la considération de l'exposition intérieure nous apparaît essentielle. Finalement, ces études sont également sujettes à un biais de confusion²⁰. Bien que les études tentent de contrôler pour plusieurs facteurs de confusion potentiels, elles le font souvent en omettant de prendre en considération leurs habitudes de vie (ex. alimentation et consommation d'alcool) (Kloog et coll., 2008; Kloog et coll., 2010; Bauer et coll., 2013; Rybnikova et coll., 2015; Portnov et coll., 2016).

Exposition à l'intérieur de la chambre à coucher

Étant donné que les études liées à l'exposition provenant d'images satellitaire ne sont pas de qualité suffisante pour juger d'un lien causal, les études ayant utilisé des questionnaires ou des entrevues afin d'estimer l'exposition à la lumière durant la nuit dans la chambre à coucher ont donc été examinées (Davis et coll., 2001; O'Leary et coll., 2006; Li et coll., 2010; Kloog et coll., 2011; Hurley et coll., 2014; Wang et coll., 2016; Keshet-Sitton et coll., 2016a; Keshet-Sitton et coll., 2016b).

Les études de bonne qualité contrôlant pour les facteurs de confusion potentiels (Davis et coll., 2001; O'Leary et coll., 2006; Li et coll., 2010; Hurley et coll., 2014) n'identifient pas une association entre le cancer du sein et la lumière la nuit, à l'exception de celle O'Leary et coll., 2006. Dans cette étude, l'exposition à la lumière la nuit augmentait le risque de cancer du sein mais uniquement chez les femmes ayant deux réveils ou plus par nuit (avec ouverture de la lumière) et ceci deux fois ou plus par semaine. Dans le cas présent, il est difficile d'attribuer cette association aux réveils ou à la lumière. Bien que le devis de ces études ne présente pas de lacunes flagrantes, l'absence d'association pourrait être sujette à un biais ou une confusion résiduelle.

Finalement, les études de Kloog et coll., 2011; Wang et coll., 2016; Keshet-Sitton et coll., 2016a; Keshet-Sitton et coll., 2016b montrent une association positive entre la lumière la nuit et le cancer du sein. Néanmoins, ces études ne contrôlaient pas pour un ou plusieurs facteurs de confusion potentiels importants tels que l'histoire familiale de cancer du sein, certaines habitudes de vie (alimentation, consommation d'alcool ou tabagisme) ou certains facteurs de risque individuels (utilisation de contraceptifs oraux, nombre d'enfants ou durée de l'allaitement) (Kloog et coll., 2011; Wang et coll., 2016; Keshet-Sitton et coll., 2016a; Keshet-Sitton et coll., 2016b). Il est donc probable que les associations présentées soient factices. De plus, l'ensemble des études sont rétrospectives. Les sujets doivent donc se remémorer leur exposition antérieure, laquelle a eu lieu 10 à

²⁰ C'est-à-dire que si les modèles ne sont pas contrôlés adéquatement il est possible que les associations attribuées puissent être expliquées par une autre variable.

15 ans auparavant. Ce type d'études est lié à un biais de rappel puisque les femmes se sachant atteintes d'un cancer du sein pourraient se remémorer plus adéquatement leur exposition antérieure ou rapporter une exposition qui ne représentait pas la réalité.

Cancer du sein - Conclusion

Les études animales et les études chez les travailleurs par quarts indiquent qu'il est biologiquement plausible qu'un dérèglement important des rythmes circadiens entraîne une augmentation du risque de cancer du sein.

Les études épidémiologiques portant sur l'exposition à la lumière la nuit et le cancer du sein sont peu nombreuses. Bien que certaines d'entre elles identifient une association positive entre la lumière la nuit et le cancer du sein, les études contrôlant adéquatement pour les facteurs de confusion ne détectent pas d'association.

L'absence d'association dans les études de meilleure qualité lors de l'évaluation de l'exposition à l'intérieur de la résidence semble indiquer qu'il est impossible de statuer, dans l'état actuel des connaissances, à une relation causale avec le cancer du sein. Étant donné que nous ne pouvons pas démontrer la causalité pour l'exposition à l'intérieur des résidences, il n'est pas possible d'affirmer que les luminaires de rue augmentent le risque de cancer.

5.3.2 Syndromes métaboliques

Les syndromes métaboliques sont définis comme un regroupement de facteurs de risque aux maladies cardiovasculaires et au diabète de type II, tels que l'obésité abdominale, un taux élevé de triglycérides, une hyperglycémie à jeun et une tension artérielle élevée (Alberti et coll., 2009). Certaines hormones métaboliques telles que la ghréline (hormone qui stimule l'appétit), la leptine (hormone de la satiété) et l'insuline (hormone qui régule la glycémie) vont ainsi connaître une oscillation circadienne durant la journée et permettre de contribuer à la synchronisation des horloges circadiennes. Plusieurs auteurs ont émis l'hypothèse que l'exposition à la lumière la nuit pourrait générer des syndromes métaboliques par l'intermédiaire du dérèglement des rythmes circadiens (Challet, 2015).

Il est également important de considérer que l'association entre les rythmes circadiens et les syndromes métaboliques est bidirectionnelle. Cela signifie que le dérèglement des rythmes circadiens peut mener à l'obésité et aux syndromes métaboliques, mais les individus obèses peuvent également présenter un dérèglement des rythmes circadiens de certaines horloges périphériques. De plus, une alimentation riche en matières grasses et en sucre a été associée au dérèglement des rythmes circadiens (Oosterman et coll., 2015).

Syndromes métaboliques - Études animales

Chez les rongeurs, un dérèglement de l'horloge centrale pourrait augmenter le risque de syndromes métaboliques. En effet, des études expérimentales, réalisées chez des souris présentant des mutations génétiques de diverses composantes de l'horloge centrale, ont montré des risques accrus d'obésité, une altération des habitudes d'alimentation ainsi que de la régulation du glucose sanguin (Turek et coll., 2005; Fonken et Nelson, 2014).

D'autres études expérimentales examinant l'impact d'une exposition à la lumière constante (24 heures) ont montré des résultats similaires. L'exposition constante à la lumière produit chez les rongeurs un

accroissement de la masse corporelle ainsi qu'une réduction de la capacité à métaboliser le glucose (Turek et coll., 2005). D'autres études ont présenté, en plus d'une augmentation de la masse corporelle, une réduction de la sensibilité à l'insuline lors d'une exposition constante à la lumière. Bien que l'étude de Fonken et Nelson, 2014 ne présente pas d'augmentation de la masse corporelle des rats en association à l'exposition à la lumière, les rats exposés aux stimuli lumineux avaient un plus grand dépôt adipeux viscéral. De plus, des rongeurs soumis à une inversion chronique du cycle lumière/noirceur de façon à reproduire le rythme d'un travailleur par quarts ont présenté une augmentation de leur masse corporelle (Van Dycke et coll., 2015).

Syndromes métaboliques - Études chez l'humain – Travailleurs par quart

En complément aux études animales, quelques études épidémiologiques chez les travailleurs par quarts (horaire de nuit ou horaire alterné) présentent des associations entre ce type de profession et les syndromes métaboliques ou certains facteurs de risque les composant (obésité abdominale, un taux élevé de triglycérides, une hyperglycémie à jeun et une tension artérielle élevée). Chez les hommes et les femmes, le travail par quarts est associé à une augmentation du risque de développer l'obésité ou des syndromes métaboliques (Lin et coll., 2009a; Karlsson et coll., 2001; Esquirol et coll., 2009; Lin et coll., 2009b). L'effet pourrait aussi perdurer dans le temps : une étude chez des employés d'une compagnie aérienne ayant démontré que les employés qui ont travaillé par quarts dans le passé présentent une plus grande prévalence d'obésité que les travailleurs de jour (Puttonen et coll., 2011). Tel que mentionné à l'Annexe 4, il est important de spécifier que ces résultats chez les travailleurs peuvent difficilement être transférés à l'exposition de la population générale aux luminaires de rue étant donné la différence entre les niveaux d'éclairement et la durée de ces expositions.

Syndromes métaboliques - Études chez l'humain – Études épidémiologiques

Seules quatre études épidémiologiques ont été relevées mettant en lien l'exposition à la lumière la nuit et les syndromes métaboliques (Tableau 8).

En plus de Fonken et Nelson, 2014 qui ont constaté que la prévalence de l'obésité est plus importante dans des régions où les niveaux de lumière la nuit sont plus élevés, des études se sont penchées sur l'association entre les images satellitaires et les syndromes métaboliques. L'étude de Rybnikova et coll., 2016a a associé l'exposition annuelle moyenne à la lumière la nuit issue d'images satellitaires à la prévalence d'obésité à l'échelle nationale. Par contre, elle est vulnérable à un biais écologique et à un biais de confusion (Annexe 4). Une deuxième étude a observé une association statistiquement significative entre l'exposition à la lumière issue d'images satellitaires et l'obésité, en comparaison au groupe peu exposé à la lumière (Koo et coll., 2016). Néanmoins, lorsque les associations sont examinées selon les groupes d'âge, les auteurs constatent que l'association persiste uniquement pour les individus les plus âgés (59-70 ans). Soulignons encore que l'utilisation d'images satellitaires comme mesure d'exposition à la lumière est peu corrélée à l'exposition individuelle.

D'autres études épidémiologiques portent sur le lien entre la lumière dans la chambre à coucher et l'indice de masse corporelle (IMC). L'étude de McFadden et coll., 2014 montre, pour une cohorte de plus de 100 000 femmes résidant au Royaume-Uni, une association positive entre le fait de dormir dans des conditions très lumineuses, comparativement à des conditions de lumière modérée ou faible, et le surpoids ou l'obésité. Cette étude présente toutefois certaines limites. L'étude est de nature transversale, regardant à un temps donné les corrélations entre deux variables; étant donné que l'hypothèse sous-jacente au développement de l'obésité en lien avec la lumière la nuit requiert une exposition sur une longue période de temps, un suivi longitudinal de sujets exempts d'obésité est nécessaire pour attester d'une relation causale. De plus, les

données d'exposition et les IMC utilisés dans cette étude sont auto-rapportés, ce qui peut induire un biais de classification non différentiel.

L'étude menée par Obayashi et coll., 2012, chez 528 participants âgés de plus de 60 ans montre que le groupe exposé à ≥ 3 lux en moyenne durant la nuit comporte plus de participants obèses ou ayant une dyslipidémie (concentration anormalement élevée ou diminuée de lipides dans le sang) que le groupe exposé à < 3 lux. Aucune association statistiquement significative n'est observée entre l'exposition à la lumière durant la nuit et le diabète. Toutefois, les auteurs se limitent à des sujets âgés de 73 ans en moyenne et les variables de contrôle retenues n'incluent pas certaines comorbidités ou difficultés de mobilité possiblement présentes chez les sujets et pouvant les inciter par mesure de sécurité à avoir un éclairage nocturne plus élevé. De plus, tout comme pour l'étude de McFadden et coll., 2014, il s'agit d'une étude de nature transversale et qui est sujette à présenter de la confusion résiduelle étant donné l'absence d'information sur certaines variables de contrôle.

Syndromes métaboliques - Conclusion

Les études animales et les études chez les travailleurs par quarts indiquent qu'il est probable qu'un dérèglement important des rythmes circadiens entraîne une augmentation du risque de syndromes métaboliques et d'obésité. Il est néanmoins peu probable que cette association soit complètement expliquée par l'exposition à la lumière.

Les études épidémiologiques portant sur l'exposition à la lumière la nuit et les syndromes métaboliques sont très peu nombreuses. Certaines d'entre elles semblent montrer une association qui serait limitée aux adultes âgés de plus de 59 ans mais elles ne sont pas de qualité suffisante pour juger de la causalité. À notre connaissance, aucune étude n'a associé directement les maladies cardiovasculaires et le diabète de type II au dérèglement des rythmes circadiens induit spécifiquement par l'exposition lumineuse la nuit.

De plus, plusieurs bémols doivent être apportés à l'interprétation des résultats de ces études. Premièrement, l'évaluation de l'exposition à la lumière la nuit pourrait souffrir d'un biais de classification important pouvant expliquer l'association présentée dans les études susmentionnées. Il semble également que ces études n'aient pas été contrôlées pour certains facteurs de confusion importants.

Aussi, l'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure à une relation de causalité entre l'exposition à la lumière la nuit (intérieur ou extérieur) et la survenue de syndromes métaboliques. Tant qu'il n'aura pas été établi de façon raisonnable que l'exposition à la lumière intérieure la nuit est nuisible pour la santé, il est déraisonnable d'inférer un effet néfaste aux luminaires de rue.

5.3.3 Autres effets sur la santé

Autres cancers

Peu d'études chez l'humain ont évalué les associations entre le travail par quarts ou l'exposition à la lumière la nuit et d'autres types de cancer (prostate, colorectal, etc.). Parmi les études portant sur le cancer de la prostate ou le cancer colorectal, certaines ont pu démontrer la présence d'une association positive alors que d'autres n'ont pas montré d'association. Toutefois, l'obésité étant un facteur de risque de nombreux cancers, il est concevable que, si une association existe entre le travail par quarts et l'obésité, celle-ci puisse s'étendre au cancer. En ce qui concerne la population générale, seules deux études écologiques traitant de ce sujet ont été répertoriées (Kloog et coll., 2009; Rybnikova et coll., 2016b). Bien que ces deux études identifient une association positive, il faudra davantage de recherches, particulièrement au niveau des individus, avant de

pouvoir statuer sur la présence d'un risque associé à ces maladies (Annexe 4). Aucune étude répertoriée sur les autres types de cancers (hormonaux-dépendants ou autres) n'a démontré de lien entre le travail par quarts ou l'exposition à la lumière la nuit et le risque de développer ces pathologies.

Dépression

Il existe une littérature scientifique abondante liant la lumière et la dépression. Cette dernière aborde principalement la luminothérapie (exposition importante à la lumière) comme traitement de la dépression Golden et coll., 2005. Cette littérature relate cependant l'effet de l'exposition à la lumière durant le jour, alors que l'exposition d'intérêt dans cet avis est l'exposition aux luminaires de rue. Très peu de littérature scientifique met en relation l'exposition à la lumière la nuit et la dépression. À notre connaissance, seule l'étude transversale de Obayashi et coll., 2013 présente une association positive entre l'éclairage dans la chambre à coucher et la dépression chez les aînés. Il est néanmoins important de noter que les associations présentées ne contrôlent pas pour plusieurs facteurs de confusion potentiels. Encore une fois, d'autres recherches seront nécessaires avant de déterminer si l'exposition à la lumière la nuit engendre la dépression.

Effets sur l'œil et la peau

Le risque photochimique pour la rétine (*Blue light hazard*) d'un luminaire de rue DEL à 4 000°K a été estimé à l'aide des valeurs limites d'exposition de l'*International Commission on Non-Ionising radiation Protection* (ICNIRP, 2013). Compte tenu de l'éloignement des luminaires de rue (plusieurs mètres de la population) et des faibles niveaux d'éclairement (section 6), il n'est pas attendu que l'éclairage de rue DEL contribue à l'apparition de tels effets sur l'œil. L'Annexe 5 présente le détail de ces estimations ainsi que de plus amples données qui démontrent que l'exposition de la population aux luminaires de rue DEL ne présenterait pas de risques pour l'œil et la peau.

Tableau 8. Résumé des caractéristiques des études répertoriées sur les effets sur la santé en lien avec l'exposition à la lumière la nuit pour la population générale

Effet sur la santé	Études	Devis	Mesure de l'exposition	Type et nombre d'observations	Contrôle des variables de confusion ¹	Biais majeurs potentiels	Qualité de l'étude ^{2,3}
Cancer du sein	Wang et coll., 2016	Cas - témoin	Questionnaire	923 cas et 918 témoins	-	Biais de rappel	+
	O'leary et coll., 2006	Cas - témoin	Questionnaire	576 cas et 585 témoins	+	Biais de rappel	++
	Davis et coll., 2001	Cas - témoin	Questionnaire	763 cas et 741 témoins	+	Biais de rappel	++
	Keset-Sitton et coll., 2016A	Cas - témoin	Questionnaire	93 cas et 185 témoins	-	Biais de rappel	+
	Keset-Sitton et coll., 2016B	Cas - témoin	Questionnaire	110 cas et 142 témoins	-	Biais de rappel	+
	Kloog et coll., 2011	Cas - témoin	Questionnaire	794 cas et 885 témoins	-	Biais de rappel	+
	Hurley et coll., 2014	Cohorte	Image satellitaire /questionnaire	106 731 participants	+	Biais de classification de l'exposition Biais de rappel	++
	Brauer et coll., 2013	Cas - témoin	Image satellitaire	34 053 cas et 14 458 témoins	-	Biais de classification de l'exposition Biais de rappel	+
	Li et coll., 2010	Cas - témoin	Questionnaire	363 cas et 356 témoins	+	Biais de rappel	++
	Kloog et coll., 2010	Écologique	Image satellitaire	164 pays	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition Biais de classification de la maladie	-
	Rybnikova et coll., 2016a	Écologique	Image satellitaire	164 pays	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition Biais de classification de la maladie	-
	Kim et coll., 2015	Écologique	Image satellitaire	248 communautés	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition	-
	Kim et coll., 2016	Écologique	Image satellitaire	25 communautés	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition	-
	Kloog et coll., 2008	Écologique	Image satellitaire	147 communautés	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition	-
	Portnov et coll., 2016	Écologique	Image satellitaire	869 secteurs de recensement	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition	-
Syndromes métaboliques	Rybnikova et coll. 2016	Écologique	Image satellitaire	137 pays	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition Biais de classification de la maladie	-
	McFadden et coll. 2014	Transversale	Questionnaire	113 343 participants	+		-
	Obayashi et coll. 2013	Transversale	Questionnaire	528 participants	-	Biais de sélection	-
	Koo et coll. 2016	Transversale	Image satellitaire	8 526 participants	+	Biais de classification de l'exposition	-
Cancer de la prostate	Kloog et coll., 2009	Écologique	image satellitaire	164 pays	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition Biais de classification de la maladie	-
	Rybnikova et coll., 2016b	Écologique	image satellitaire	180 pays	-	Biais écologique Biais de classification de l'exposition Biais de classification de la maladie	-
Dépression	Obayashi et coll. 2013	Transversale	questionnaire	516 participants	-	Biais de sélection	-

¹ + : Études contrôlant adéquatement pour la confusion; - : Études ne contrôlant pas adéquatement pour la confusion

² ++ : Études de bonne qualité; + : Études de qualité modérée; - : Études de qualité insuffisante

³ La qualité des études est évaluée selon leur capacité à identifier une relation causale. Les études ayant un devis transversal ou écologique sont considérées comme ayant une qualité insuffisante. Les études présentant un devis approprié, mais ne contrôlant pas adéquatement pour la confusion sont considérées de qualité modérée

6. ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES DE L'ÉCLAIRAGE DE RUE DEL

La présente section a pour objectif de connaître l'exposition de la population à la lumière bleue provenant des luminaires de rue DEL à 4 000°K et de la comparer avec d'autres expositions déjà présentes dans notre environnement en vue de déterminer si, effectivement, les luminaires de rue prévus sur le territoire de la Ville de Montréal représentent une augmentation significative à la lumière bleue pour ses citoyens. Par la suite, les risques potentiels de cette exposition à la lumière bleue pour la santé des citoyens de Montréal seront expliqués.

Avant de présenter cette analyse de risques sanitaires de l'éclairage de rue DEL à 4 000°K, la section 6.1 définit les longueurs d'onde qui seront retenues pour représenter la lumière bleue et explique pourquoi il faut utiliser la « quantité » de lumière bleue plutôt que le « pourcentage » de lumière bleue lorsqu'on évalue l'exposition humaine. Puis, la section 6.2 fournit les données en termes de niveau d'éclairement et de composition spectrale des luminaires de rue qui sont utilisées pour calculer l'exposition des citoyens à la lumière bleue et compare ensuite l'exposition provenant de l'éclairage de rue avec l'exposition déjà présente à l'intérieur des maisons. La section 6.3 conclut sur les risques potentiels que les luminaires de rue DEL à 4 000°K sur la santé de la population. Enfin, la section 6.4 rapporte les constats émis par d'autres scientifiques quant aux risques associés à l'éclairage de rue DEL.

6.1 Définition des longueurs d'onde associées à la lumière bleue

Il n'existe pas de définition universelle de la lumière bleue. Selon le propos, les longueurs d'onde du spectre visible associées à la lumière bleue peuvent varier.

La première définition de la lumière bleue s'appuie sur les longueurs d'onde qui sont associées à la perception des couleurs (Figure 25). Même si le spectre de lumière visible est continu (de 380 à 780 nm) et ne présente pas de limites claires entre les différentes couleurs, la couleur bleue correspond environ aux longueurs d'onde de 446 à 500 nm (CNRS, 2016).

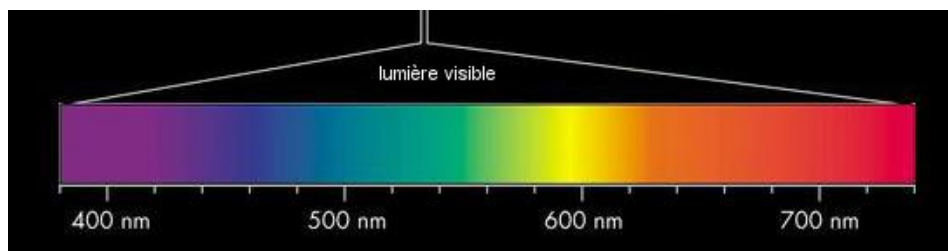


Figure 25. Longueurs d'onde du spectre visible (380 à 780 nm)

Source : Vauthier, 2010

Une autre définition de la lumière bleue est présentée dans la nouvelle norme *Éclairage extérieur – Contrôle de la pollution lumineuse* du Bureau de normalisation du Québec (BNQ, 2016). Les auteurs considèrent que les longueurs d'onde comprises entre 405 et 530 nm sont plus particulièrement associées au voilement du ciel et à la perturbation des cycles biologiques.

Du côté des effets de la lumière bleue sur la santé, les longueurs d'onde situées entre 380 et 580 nm sont associées à une inhibition de la sécrétion de la mélatonine (Composition spectrale de la lumière de la section 5.2.2) (DIN V 5031-100:2009-06, 2009) et l'évaluation du *Blue light hazard* tient compte des longueurs d'onde qui se situent entre 300 et 700 nm (Annexe 4) (ICNIRP, 2013).

Aussi, dans le cadre de la présente évaluation de l'exposition des citoyens à la lumière bleue émise par des luminaires de rue DEL à 4 000°K, deux différentes étendues de longueurs d'onde ont été retenues pour définir la lumière bleue :

- Longueurs d'onde de 405 à 530 nm (tirées de la norme du BNQ, 2016)
- Longueurs d'onde de 380 à 580 nm (associées à l'inhibition de la sécrétion de la mélatonine selon DIN V 5031-100:2009-06, 2009)

La lumière bleue des luminaires et des lampes intérieures est souvent présentée en pourcentage. Par exemple, la lumière émise par un luminaire de rue DEL à 4 000°K contient environ 31% de lumière bleue alors que celle émise par un luminaire HPS n'en contient que 10% (Tableau 10). Mais une telle comparaison ne permet pas d'apprécier la différence réelle en termes d'exposition humaine à la lumière bleue, car elle ne tient pas compte de la puissance des luminaires. En effet, même si un luminaire HPS 300 W et un autre luminaire HPS 150 W émettent tous deux le même pourcentage de lumière bleue (10%), le luminaire HPS 300 W émet, en fait, une quantité deux fois plus importante de lumière bleue que le luminaire HPS 150 W.

Le recours à la « quantité » de lumière bleue plutôt qu'au « pourcentage » de lumière bleue sera donc utilisé dans la présente évaluation de l'exposition de la population.

6.2 Calcul de l'exposition de la population à la lumière bleue émise par les luminaires de rue et d'autres sources lumineuses intérieures

Pour estimer l'exposition de la population à la lumière bleue, il faut connaître les niveaux d'éclairement (section 6.2.1) des citoyens en provenance des luminaires de rue ainsi que leur flux énergétique spectral (section 6.2.2). Le détail des calculs effectués dans la section 6.2 est présenté à l'Annexe 7.

6.2.1 Estimation des niveaux d'éclairement

Comme les effets potentiels de la lumière sur la suppression de la mélatonine sont directement associés à la quantité de lumière qui atteint la cornée, l'« éclairement à l'œil » (lux) est la mesure qui apparaît la plus adéquate pour estimer l'exposition humaine à la lumière bleue émise par les luminaires de rue. L'exposition à l'œil de la population sera considérée pour trois scénarios :

- Un citoyen marche sur un trottoir éclairé par les luminaires de rue
- Un citoyen lit un livre papier à l'intérieur de sa maison
- Un citoyen est dans sa chambre à coucher située face à un luminaire de rue, lampes intérieures éteintes et rideaux fermés

Niveaux d'éclairage sur le trottoir. Les niveaux d'éclairage à l'œil estimés sur le trottoir par la Ville de Montréal varient de 3 à 8 lux selon qu'il s'agisse d'une rue résidentielle ou d'une grande artère (Tableau 9) (Ville de Montréal, 2016). Ces niveaux d'éclairage à l'œil sont comparables aux niveaux minimums d'éclairage vertical de 2 à 10 lux prescrits dans la norme RP-8-14 au niveau des trottoirs²¹ (IES, 2014) et que les mesures d'éclairage à l'œil réalisées par la DRSP, 2016 sur les trottoirs de quelques endroits de la ville de Montréal (3 à 7 lux). Une description de la méthode de mesure et des appareils de mesure utilisés par la DRSP est présentée à l'Annexe 6.

Niveaux d'éclairage lors de la lecture d'un livre à l'intérieur de la maison. Les données d'éclairage à l'œil lors de la lecture d'un livre papier sont tirées de deux récentes études. Gronli et coll., 2016 ont mesuré un éclairage de 26,7 +/- 8,0 lux au niveau de l'œil de 20 sujets lorsque ceux-ci lisaient un livre dans leur lit avec leur éclairage de lecture habituel. Les 14 sujets de l'expérimentation de Rangtall et coll., 2016 étaient, quant à eux, exposés à des niveaux d'éclairage de 67,3 +/- 49,9 lux à l'œil lors de la lecture d'un livre dans le laboratoire des chercheurs; lors des mesures d'éclairage, les lumières du plafond étaient éteintes et une lampe de lecture (température de couleur de 2 674°K) était allumée sur le bureau où étaient assis les sujets. Les résultats de l'étude de Gronli et coll., 2016 sont semblables au niveau d'éclairage à l'œil mesuré par la DRSP, 2016 (25 lux).

Niveau d'éclairage de la chambre à coucher. Des niveaux d'éclairage à l'œil sont également disponibles pour tenir compte de l'exposition des citoyens à la lumière provenant des luminaires de rue lorsqu'ils sont à l'intérieur de leur résidence durant la nuit. À cet effet, Kinzey, 2016 a mesuré des niveaux d'éclairage vertical à une fenêtre située face à une rue éclairée de l'ordre de 0 lux (rideaux fermés) et moins de 0,1 lux (rideaux ouverts) lorsque les lampes intérieures sont fermées. La DRSP, 2016 a mesuré des niveaux comparables à la fenêtre de quelques maisons éclairées par des luminaires de rue (Tableau 9).

²¹ Rappelons que l'éclairage vertical de la norme RP-8-14 correspond à l'éclairage mesuré à 1,5 m de hauteur, dans les deux directions de la rue et parallèlement au sens de la circulation des piétons.

Tableau 9. Niveaux d'éclairage à l'œil sur les trottoirs et à l'intérieur des résidences

Type d'appareil	Éclairage à l'œil (lux)	Source
Exposition en marchant sur le trottoir		
Luminaire de rue – éclairage vertical moyen sur le trottoir		
- Rue résidentielle	3	Ville de Montréal, 2016
- Artère	3	
- Grande artère	8	
Luminaire de rue – éclairage vertical minimal sur le trottoir	2 à 10	IES, 2014
- Densité de piétons moyenne à élevée		
Luminaire de rue - éclairage mesuré sur le trottoir	3 à 7	DRSP, 2016 ¹
- Quelques rues de Montréal		
Exposition à l'intérieur de la maison		
Lecture d'un livre papier éclairé par une lampe		
- Dans la résidence des sujets de l'étude	26,7 +/- 8,0	Gronli et coll., 2016 Rangtall et coll., 2016
- Au laboratoire des chercheurs	67,3 +/- 49,9	
Lecture d'un livre papier éclairé par une lampe		
- Dans quelques résidences	25	DRSP, 2016 ¹
Éclairage vertical d'une fenêtre située face à la rue éclairée le soir		
- Lampes intérieures éteintes et rideaux ouverts	≤ 0,1	Kinzey, 2016
- Lampes intérieures éteintes et rideaux fermés	0	
Éclairage vertical d'une fenêtre située face à la rue éclairée le soir		
- Lampes intérieures éteintes et rideaux ouverts	1,2 ²	DRSP, 2016 ¹
- Lampes intérieures éteintes et rideaux fermés	≤ 0,1 ³	

¹ La méthode de mesure de l'éclairage est décrite à l'Annexe 6.

² La fenêtre est située à environ 6 m d'un luminaire de rue HPS.

³ Bien qu'une valeur de 0,0 lux ait été mesurée, la valeur de 0,1 lux a été retenue pour l'estimation de l'exposition la nuit dans la chambre à coucher puisque l'appareil de mesure utilisé permet de mesurer l'éclairage au dixième de lux.

Les niveaux moyens d'éclairage à l'œil retenus pour l'exposition de la population dans la présente évaluation sont :

- 3 et 8 lux pour l'exposition des passants qui circulent sur les trottoirs
- 27 et 67 lux pour l'exposition du lecteur d'un livre éclairé par une lampe intérieure
- 0,1 lux pour l'exposition d'un résident dans sa chambre à coucher, lampes intérieures éteintes et rideaux fermés durant la nuit²²

Les scénarios impliquant une exposition de 3 lux sur le trottoir, de 27 lux lors de la lecture d'un livre et 0,1 lux à l'intérieur d'une chambre à coucher sont détaillés à la section 6.2.2. Le lecteur trouvera les résultats des calculs d'exposition à la lumière bleue pour le scénario d'une exposition de 8 lux sur le trottoir et de 67 lux lors de la lecture d'un livre à l'Annexe 8.

6.2.2 Estimation de la quantité de lumière bleue

En plus des niveaux d'éclairage, il faut également connaître la quantité de lumière bleue provenant des luminaires de rue et des lampes intérieures, ce qui peut être évaluée à partir du flux énergétique spectral de ces sources lumineuses.

²² Bien qu'une valeur de 0,0 lux ait été mesurée, la valeur de 0,1 lux a été retenue pour l'estimation de l'exposition la nuit dans la chambre à coucher puisque l'appareil de mesure utilisé permet de mesurer l'éclairage au dixième de lux.

Distribution énergétique spectrale des luminaires de rue. La Figure 26 présente la distribution énergétique spectrale de trois luminaires de rue comparables²³ pouvant être utilisés sur une rue résidentielle : luminaire HPS 150 W à 2 100°K (courbe rouge), luminaire HM 150 W à 3 500°K (courbe verte) et luminaire DEL 88 W à 4 000°K (courbe bleue) (Ville de Montréal, 2016)²⁴. Le flux énergétique du luminaire DEL à 4 000°K est plus élevé dans les longueurs d'onde de la lumière bleue que pour les luminaires HPS et HM correspondants.

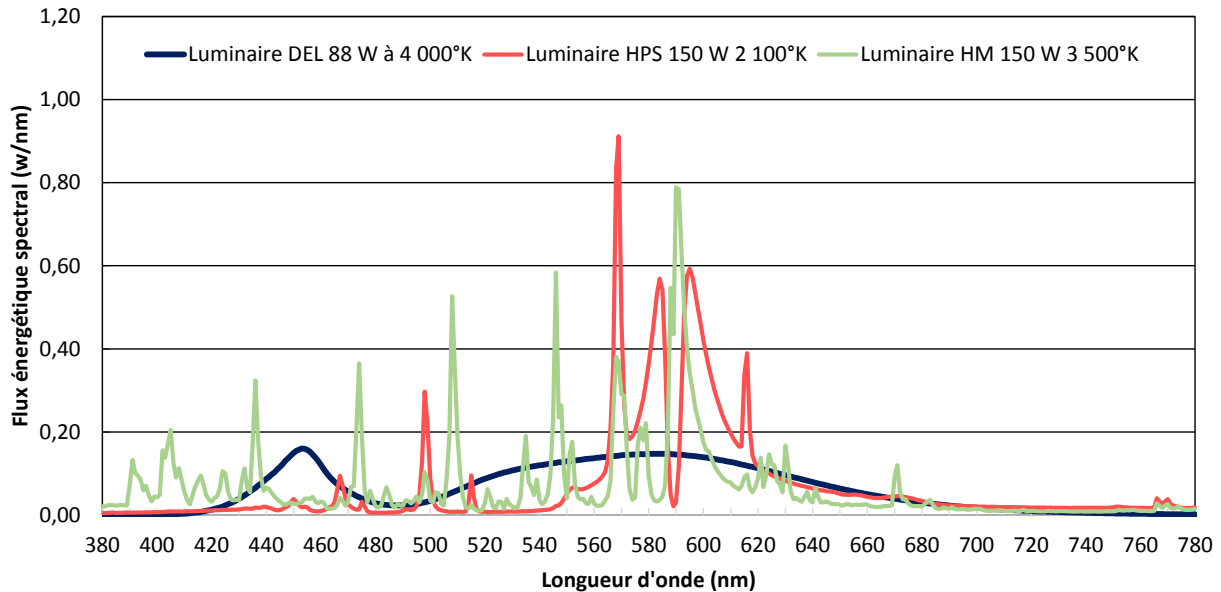


Figure 26. Comparaison du flux énergétique spectral d'un luminaire HPS 150 W à 2 100°K (courbe rouge), d'un luminaire HM 150 W à 3 500°K (courbe verte) et d'un luminaire DEL 88 W à 4 000°K (courbe bleue)

Source : Ville de Montréal, 2016

Distribution énergétique spectrale des lampes intérieures des résidences. Quant à la distribution spectrale de différents types de lampes intérieures utilisées pour la lecture d'un livre papier, les données disponibles dans la Banque de données spectrale d'ampoules d'usage domestique et public du CEGEP de Sherbrooke ont été utilisées pour quatre types d'ampoules comparables en termes d'éclairage²³ : incandescente Rona A19 de 100 W, fluorocompacte EnergyStar Twister de 20 W, halogène Sylvania PAR38 de 65 W et DEL Standard PAR30 de 9 W (Roby et coll., 2016)^{25, 26}.

²³ On entend par comparables, des luminaires de rue ou des lampes intérieures qui peuvent fournir sensiblement le même niveau d'éclairage.

²⁴ Les données de flux énergétique spectral des différents luminaires de rue proviennent de la Ville de Montréal et sont disponibles à l'Annexe 7.

²⁵ Les données de flux énergétique spectral de l'ampoule incandescente Rona A19 de 100 W sont disponibles à l'adresse <http://galileo.graphyics.cegepshebrooke.qc.ca/app/fr/lamps/2475>, celles de l'ampoule fluorocompacte EnergyStar Twister de 20 W à l'adresse <http://galileo.graphyics.cegepshebrooke.qc.ca/app/fr/lamps/2479>, celles de l'ampoule halogène Sylvania PAR38 de 65 W à l'adresse <http://galileo.graphyics.cegepshebrooke.qc.ca/app/fr/lamps/2514> et celles de l'ampoule DEL Standard PAR30 de 9 W à l'adresse <http://galileo.graphyics.cegepshebrooke.qc.ca/app/fr/lamps/2540>.

²⁶ Il faut cependant souligner que les lampes intérieures retenues dans la présente évaluation ont toutes des températures de couleur semblables (2 450 à 3 000°K) et émettent moins de lumière bleue que d'autres lampes intérieures de même technologie mais dont la température de couleur est plus élevée. Par exemple, on peut retrouver, dans la Banque de données spectrales de lampes du CEGEP de Sherbrooke, une lampe intérieure fluorocompacte à 5 000°K (Globe Twister *daylight*, 13 W, 36,9% de lumière bleue 405-530 nm), un fluorescent à 4 000°K (GE T8 G13, 32 W, 26,7% de lumière bleue 405-530 nm) et une lampe intérieure DEL à 5 896°K (Ledtech PAR20, 8 W, 43,0% de lumière bleue 405-530 nm).

6.2.3 Comparaison de l'exposition de la population à la lumière bleue émise par les luminaires de rue et présente à l'intérieur de la maison

Le Tableau 10 présente les résultats des estimations de l'exposition de la population à la lumière bleue des trois scénarios : un citoyen marche sur le trottoir (3 lux), il lit un livre papier à l'intérieur de sa maison (27 lux) et sa chambre à coucher est très faiblement éclairée par la lumière provenant d'un luminaire de rue ($< 0,1$ lux) – luminaire de rue DEL 88 W à 4 000°K. On y retrouve d'abord quelques caractéristiques des luminaires de rue et des lampes intérieures : puissance totale (W), température de couleur (°K) et pourcentage de lumière bleu calculé dans l'étendue des longueurs d'onde de 405 à 530 nm. Il est possible de consulter l'Annexe 7 pour de plus amples détails.

Les autres colonnes du Tableau 10 représentent les quantités de lumière bleue auxquelles les citoyens sont exposés, au niveau de l'œil, dans les trois scénarios :

- Une première série de données représente les quantités de lumière bleue entre les longueurs d'onde de 405 à 530 nm et une deuxième série présente les quantités de lumière bleue entre les longueurs d'onde de 380 et 580 nm. Pour chacune de ces séries, on retrouve d'abord les valeurs d'exposition exprimées en termes de puissance (watt) de lumière bleue (W) ainsi que la variation de ces données par rapport à celle du luminaire de rue DEL 88 W à 4 000°K (= 1,0) de façon à faciliter la comparaison entre les différents scénarios d'exposition.
- Les deux dernières colonnes du Tableau 10 représentent les quantités de lumière bleue de 380 et 580 nm pondérées à l'aide de la courbe de sensibilité de la mélatonine à la lumière en termes de puissance (watt) de lumière bleue pondérée (W*) (courbe de sensibilité de DIN V 5031-100:2009-06, 2009 présentée à la section 5.2.2) ainsi que la variation de ces données par rapport à celle du luminaire de rue DEL 88 W à 4 000°K (= 1,0).

Rappelons que le lecteur trouvera le même type de résultats provenant de la comparaison des estimations de l'exposition de la population à la lumière bleue pour le scénario qui se déroule sur une grande artère (8 lux à l'œil) et pour le scénario qui considère une exposition à l'œil de 67 lux lors de la lecture d'un livre papier – luminaire de rue DEL 108 W à 4 000°K à l'Annexe 8. Soulignons dès maintenant que ces données conduisent aux mêmes conclusions que celles présentées ci-après.

Tableau 10. Comparaison de l'exposition à la lumière bleue émise lors d'une marche sur le trottoir d'une rue résidentielle (3 lux) éclairée par différents types de luminaires de rue, lors de la lecture d'un livre papier éclairé par différents types de lampes intérieures (27 lux) et dans la chambre à coucher avec les lampes intérieures éteintes et les rideaux fermés (0,1 lux) – Luminaire de rue DEL 88 W à 4 000°K

SCÉNARIOS D'EXPOSITION		CARACTÉRISTIQUES DES LUMINAIRES ET DES LAMPES INTÉRIEURES			EXPOSITION À L'CEIL À LA QUANTITÉ DE LUMIÈRE BLEUE					
Activité (éclairage à l'œil)	Type de luminaires de rue ou de lampes intérieures	Puissance totale (W)	Température de couleur (°K)	Pourcentage de bleu (405-530 nm)	En fonction des longueurs d'onde de 405 à 530 nm ¹		En fonction des longueurs d'onde de 380 et 580 nm ²		En fonction de la courbe de sensibilité de la mélatonine ³	
					Puissance de lumière bleue (W)	Variation ⁴ par rapport au luminaire de rue DEL à 4 000°K (sans unité)	Puissance de lumière bleue (W)	Variation ⁴ par rapport au luminaire de rue DEL à 4 000°K (sans unité)	Puissance de lumière bleue pondérée (W*)	Variation ⁴ par rapport au luminaire de rue DEL à 4 000°K (sans unité)
Marcher sur le trottoir éclairé par un luminaire de rue (3 lux) ⁵	HPS	150	2 100	10%	0,001	0,3	0,003	0,6	0,001	0,3
	HM	150	3 500	30%	0,003	1,0	0,005	1,0	0,002	0,9
	DEL	88	4 000	31%	0,003	1,0	0,005	1,0	0,002	1,0
Lire un livre éclairé par une lampe intérieure (27 lux) ⁶	Incandescent	100	2 450	11%	0,014	5,2	0,032	6,2	0,010	4,6
	Fluorocompacte	20	2 700	11%	0,008	3,0	0,030	6,0	0,008	3,7
	Halogène	65	3 000	13%	0,015	5,7	0,034	6,8	0,011	5,0
	DEL	9	3 000	25%	0,021	7,6	0,041	8,2	0,017	7,6
Dans la chambre à coucher (< 0,1 lux) ⁷	Luminaire de rue DEL	88	4 000	31%	< 0,0001	0,03	< 0,0001	0,02	< 0,0001	0,05

W* : Puissance en watt de lumière bleue comprise entre 380 et 580 nm et pondérée selon la courbe de sensibilité de la mélatonine dans DIN V 5031-100:2009-06, 2009

¹ Étendue de longueurs d'onde retenue par la norme du BNQ, 2016

² Étendue de longueurs d'onde retenue par DIN V 5031-100:2009-06, 2009

³ Calculé selon la courbe de sensibilité de la mélatonine de DIN V 5031-100:2009-06, 2009

⁴ La variation a été calculée selon l'équation : Puissance du luminaire ou de la lampe (W) / Puissance du luminaire DEL à 4 000°K (W)

⁵ Valeur moyenne d'exposition à l'œil (éclairage vertical) d'une personne circulant sur le trottoir d'une rue résidentielle de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2016)

⁶ Valeur moyenne d'exposition à l'œil des sujets de l'étude de Gronli et coll., 2016

⁷ Valeur retenue par la DRSP, 2016

Scénario de l'exposition lors d'une marche sur le trottoir d'une rue résidentielle (3 lux) éclairée par différents luminaires de rue. Parmi les différents luminaires, le luminaire HPS 150W est celui qui présente le plus faible pourcentage de lumière bleue (10% - 405-530 nm) et qui émet effectivement la plus petite quantité de lumière bleue (0,001 W - 405-530 nm) (Tableau 10). Cependant, quoique le luminaire de rue DEL 88 W à 4 000°K présente un pourcentage de lumière bleue (31% - 405-530nm) trois fois plus élevé que celui du luminaire de rue HPS 150W, cette différence ne représente qu'une très petite augmentation de l'exposition à l'œil en termes de quantité de lumière bleue (0,002 W). Soulignons que le luminaire HM 150 W, en opération depuis des années sur certaines rues du territoire de la Ville de Montréal, émet sensiblement le même pourcentage (30% - 405-530 nm) et expose les citoyens à la même quantité de lumière bleue à l'œil (0,003 W – 405-530 nm) que le luminaire de rue DEL à 4 000°K.

Comparaison de l'exposition sur le trottoir provenant des luminaires de rue (3 lux) et celle associée à la lecture d'un livre éclairé par des lampes intérieures (27 lux). L'exposition à l'œil à la quantité de lumière bleue d'un citoyen marchant sur le trottoir d'une rue résidentielle, quel que soit le type d'éclairage, HPS, HM et DEL à 4 000°K (0,001 à 0,003 W – 405-530 nm), est bien inférieure à l'exposition à l'œil d'une personne qui lit un livre à l'intérieur de sa maison, même éclairé par une lampe incandescente (0,014 W – 405-530 nm) (Tableau 10). En effet, l'exposition à l'œil à la quantité de lumière bleue provenant de la lecture d'un livre éclairé par des lampes incandescente, fluocompacte, halogène et DEL à 3 000°K est de 3,0 à 7,6 fois plus importante que celle de la personne qui marche sur le trottoir d'une rue résidentielle éclairée par un luminaire DEL 88W à 4 000°K (lumière bleue – 405-530 nm). Il en est sensiblement de même lorsqu'on considère l'exposition à l'œil à la quantité de lumière bleue émise dans les longueurs d'onde de 380 et 580 nm (6,0 à 8,2 fois plus importante) et l'exposition à l'œil à la quantité de lumière bleue émise de 380 et 580 nm et pondérée selon la courbe de sensibilité de la mélatonine de DIN V 5031-100:2009-06, 2009 (3,7 à 7,6 fois plus importante).

Exposition à l'intérieur d'une chambre à coucher (< 0,1 lux). L'exposition à l'œil à la quantité de lumière bleue d'une personne se tenant dans sa chambre à coucher, les lampes intérieures éteintes et les rideaux fermés, serait inférieure à 0,0001 W, ce qui est extrêmement faible.

Considérations

Les calculs d'exposition à la lumière bleue des résidents ont été faits de façon à représenter l'exposition de la majorité de la population, tant à la lumière bleue émise par les luminaires de rue qu'à celle provenant des lampes intérieures lors de la lecture d'un livre. Différentes hypothèses ont alors été retenues afin de calculer ces expositions. D'autres hypothèses auraient pu être utilisées, mais, tel que décrit ci-dessous, elles auraient mené aux mêmes conclusions.

- Les niveaux d'éclairement à l'œil des citoyens qui marchent sur le trottoir ont été estimés à 3 à 8 lux. Il est cependant clair que ce type d'exposition peut être plus important si on tient compte de la lumière provenant des phares d'automobiles, de l'éclairage extérieur privé et des enseignes lumineuses disposés le long des rues. Mais comme l'objectif de cette évaluation est d'estimer les risques associés aux luminaires de rue DEL à 4 000°K, seule cette exposition a été considérée.
- Les estimations de l'exposition ont considéré une comparaison de l'exposition à l'œil (3 lux) à la lumière bleue provenant d'un luminaire DEL 88 W à 4 000°K sur une rue résidentielle et 27 lux lors de la lecture d'un livre selon Gronli et coll., 2016. Les résultats d'estimations de l'exposition à l'œil (8 lux) à la lumière bleue provenant d'un luminaire DEL 108 W à 4 000°K

et 67 lux lors de la lecture d'un livre selon Rangtall et coll., 2016 sont présentés à l'Annexe 8 et mènent aux mêmes conclusions.

- Tel que spécifié à la section 4.1, les nouveaux luminaires de rue DEL de la Ville de Montréal auront une puissance variant de 35 à 132 W. Les luminaires de rue DEL 88 W et 108 W à 4 000°K utilisés dans la présente évaluation représentent la vaste majorité des luminaires prévus sur les rues et artères du territoire de la Ville de Montréal. Même si le luminaire de rue DEL 132 W avait été utilisé dans la présente évaluation, les résultats auraient été comparables à ceux estimés dans ce document.
- La courbe de DIN V 5031-100:2009-06, 2009 a été utilisée lors des estimations de l'exposition à l'œil à la quantité de lumière bleue pondérée pour la sensibilité de la mélatonine à certaines longueurs d'onde. Cependant, tel que décrit à la section 5, il n'y a actuellement aucun consensus dans la littérature scientifique concernant la courbe de sensibilité de la mélatonine et l'indice de sensibilité à la mélatonine qui devraient être utilisés²⁷. Les estimations de la quantité de lumière bleue pondérée pour la sensibilité de la mélatonine à l'œil sont donc présentées à titre comparatif dans le présent document. Rappelons que les estimations de l'impact de la lumière bleue sur la suppression de la mélatonine ne représentent pas un effet néfaste pour la santé, mais plutôt un effet physiologique.

6.3 Évaluation des risques à la santé associés aux luminaires de rue DEL de la Ville de Montréal

Suite aux préoccupations concernant les risques à la santé que le remplacement des luminaires de rue actuels (HPS et HM) par des luminaires de rue DEL à 4 000°K a soulevées chez plusieurs, l'analyse réalisée précédemment permet de faire les constatations suivantes.

- Contrairement à l'utilisation seule des pourcentages de lumière bleue, l'utilisation de la quantité de lumière bleue émise par les sources lumineuses et atteignant l'œil permet d'estimer l'exposition humaine.
- La conversion aux luminaires de rue DEL à 4 000°K n'entraînera qu'une très petite augmentation de l'exposition des citoyens de la Ville de Montréal à la lumière bleue lorsqu'ils se promènent sur les trottoirs. De plus, dans certains secteurs de la ville qui sont déjà éclairés par des luminaires de rue HM, l'exposition des citoyens à la quantité de lumière bleue ne changera pas du tout suite à la conversion aux luminaires de rue DEL à 4 000°K.
- L'exposition des citoyens à la lumière bleue provenant des luminaires de rue DEL à 4 000°K est bien plus faible que leur exposition actuelle à la lumière bleue provenant des lampes intérieures utilisées dans toutes les maisons (ex. incandescentes, fluorocompactes, halogènes, DEL). De plus, lorsqu'on considère que la population passe généralement beaucoup plus de temps à l'intérieur des bâtiments qu'à l'extérieur, leur exposition à la lumière bleue provenant des luminaires de rue DEL à 4 000°K est minime.

²⁷ Pour cette raison, il est important de noter que la puissance de lumière bleue pondérée calculée dans ce rapport ne se compare pas directement aux indices mélanopiques élaborés par certains auteurs. En effet, contrairement à ce qui a été calculé en termes de puissance de lumière bleue pondérée (W^*), plusieurs de ces auteurs ne considèrent pas le niveau d'éclairement lors du calcul de leur indice mélanopique.

- Quant à l'exposition des résidents de la Ville de Montréal à la lumière bleue durant la nuit, elle est extrêmement faible lorsque leurs lampes intérieures sont éteintes et leurs rideaux sont fermés. Il faut également rappeler qu'une infime quantité de lumière ambiante réussit à se rendre à la rétine lorsque les paupières sont closes (section 5). La lumière intrusive qui pourrait provenir des luminaires de rue ne contribue pas à augmenter l'exposition à la lumière bleue.

6.4 Revue de quelques évaluations de risques tirées de la littérature

Plusieurs scientifiques se sont intéressés à l'évaluation des risques de l'exposition à la lumière bleue émise par les luminaires de rue DEL sur la santé humaine. Cinq de ces analyses de risques qualitatives ou quantitatives portant sur la conversion des luminaires de rue DEL sont présentées ci-dessous.

Trafford, Royaume-Uni, 2013

L'étude réalisée par le *Centre for Health Impact Assessment* de l'*Institute of Occupational Medicine* visait à rapporter de manière objective les effets positifs et négatifs pouvant être escomptés lors de la conversion aux luminaires de rue DEL. Les auteurs concluent leur analyse d'impact en mentionnant que, bien que certaines études identifient un lien entre la lumière la nuit et la santé ou le bien-être de la population, les preuves sont de faible qualité puisqu'elles sont essentiellement composées d'études animales, in-vitro et d'études écologiques. Selon les auteurs, la conversion aux luminaires DEL n'entraînerait pas d'impact, sinon une faible amélioration de la santé de la population principalement attribuable à une augmentation de la sécurité (Salim et Wright, 2013).

Cambridge, États-Unis, 2014

En 2014, lors de la conversion de l'éclairage de rue par environ 7 000 luminaires DEL à 4 000°K dans la ville de Cambridge, le *Cambridge Electrical Department* a demandé l'avis d'experts du domaine de la santé. Ces auteurs ont d'abord rappelé que l'exposition à la lumière, et particulièrement à la lumière bleue, peut influencer les rythmes circadiens. Ils ont également identifié que la lumière provenant des luminaires de rue est considérablement plus faible que celle émise par l'éclairage intérieur ou les appareils électroniques, et qu'elle pourrait ne pas être suffisante pour engendrer un effet négatif sur les rythmes circadiens. De plus, ils ont signalé que la quantité de lumière entrant dans les résidences en provenance des luminaires de rue est excessivement faible. Ils recommandent toutefois aux municipalités d'utiliser des luminaires avec une température de couleur de 4 000°K ou moins et aux citoyens de placer des rideaux opaques dans les chambres à coucher et d'augmenter leur exposition à la lumière durant la journée dans le but de minimiser les effets de l'exposition à la lumière la nuit (Lockley et Lipson, 2014).

Lighting Research Center, États-Unis, 2014

Des scientifiques du *Lighting Research Center* ont estimé les niveaux de suppression de la mélatonine générés par l'exposition à l'œil à trois niveaux d'éclairement (18, 27 et 95 lux²⁸) provenant de quatre

²⁸ La valeur de 18 lux représente l'exposition à l'œil d'un individu qui regarde directement un luminaire situé à 10 m tandis que celle de 27 lux est associée à l'exposition d'une personne située à 3 m d'un luminaire et qui regarde la rue

types de luminaires de rue de 150 W (luminaire HPS à 2 050°K, luminaire HM à 4 000°K, luminaire DEL à 5 200°K et luminaire DEL à 6 900°K). Les scénarios considéraient une heure d'exposition à cette source de lumière pour un jeune de 20 ans. En utilisant une exposition à 18 lux et à 27 lux, et en considérant que, selon les auteurs, au moins 10% de la mélatonine doit être supprimé avant de pouvoir être estimée de façon fiable, seul le luminaire DEL à 6 900°K aurait un effet sur la suppression de la mélatonine (12% pour une exposition à 18 lux et 15% pour une exposition à 27 lux). Les auteurs rappellent qu'une stimulation des rythmes circadiens durant la nuit ne signifie pas nécessairement un risque pour la santé (Rea et coll., 2014)²⁹.

American Medical Association, États-Unis, 2016

L'*American Medical Association* (AMA) a récemment adopté des orientations et proposé aux communautés d'opter pour des luminaires d'une température de couleur de 3 000°K ou moins pour l'éclairage de rue afin de minimiser les effets potentiellement nocifs pour la santé humaine et pour l'environnement. L'AMA justifie cette recommandation sur la base du pourcentage de 21% en lumière bleue des luminaires DEL à 3 000°K. Selon elle, un pourcentage de 21% (comparativement à 29% pour les luminaires de 4 000°K) réduirait raisonnablement l'éblouissement d'incapacité et d'inconfort, minimiserait les effets potentiels de la lumière bleue sur la santé et rendrait la lumière plus plaisante pour l'humain ainsi que moins nuisible pour la faune. Cependant, l'AMA ne présente aucune référence qui appuie le choix d'une température de couleur de 3 000°K et se base plutôt sur les plaintes faites par des citoyens de plusieurs localités aux États-Unis où des luminaires 4 000°K ont été installés. L'AMA spécifie tout de même que des mesures au niveau des rues éclairées aux DEL devraient être faites avant de pouvoir statuer sur un impact éventuel de ce type d'éclairage sur la suppression de mélatonine (AMA, 2016).

L'évaluation faite dans le présent avis indique que l'exposition à la quantité de lumière bleue des lumières DEL à 4 000°K est très faible comparativement à celle des luminaires HPS.

Municipal Solid-State Street Lighting Consortium, Department of Energy, États-Unis, 2016

Bruce Kinsey, directeur du *Municipal Solid-State Street Lighting Consortium*, U. S. Department of Energy est d'avis que les luminaires DEL qui remplacent ou remplaceront les luminaires existants (HPS ou HM) émettent beaucoup moins de lumière en termes de flux lumineux (lumen). Par exemple, un luminaire DEL qui émet deux fois plus de lumière bleue qu'un luminaire HPS, mais dont on utilise que le tiers de sa capacité, émettra au final moins de lumière bleue que l'éclairage HPS. Ainsi, la réduction de l'intensité d'un luminaire DEL par l'utilisation d'un système de gradateurs pourrait réduire proportionnellement la quantité de lumière bleue émise. Ainsi, d'un point de vue technique, il considère que de remplacer des luminaires DEL 4000°K par des 3000°K ne diminuera pas de manière significative l'impact que pourrait avoir la lumière bleue émise par ces sources sur l'inhibition de la sécrétion de mélatonine (Kinsey, 2016).

(cette valeur est semblable à l'éclairement mesuré tout près des luminaires piétons DEL à 4 000°K installés le long des pistes cyclables de l'Île-des-Sœurs décrites à la section 4.2). La valeur de 95 lux représente une valeur de référence mesurée en laboratoire et n'est pas du tout un niveau d'exposition auquel la population peut être exposée sur la rue.

²⁹ Bien que cette étude soit réalisée par des experts dans le domaine, elle a été préparée pour l'*Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies* une organisation collaborative entre les chercheurs, les organismes gouvernementaux et les manufacturiers dans le domaine de la lumière.

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au cours des prochaines années, la Ville de Montréal projette de remplacer ses luminaires existants (luminaires de rue sodium haute pression (HPS) et luminaires de rue aux halogénures métalliques (HM)) par des luminaires DEL ayant une température de couleur de 4 000°K. Certains citoyens ont exprimé des préoccupations relativement à la plus grande proportion de lumière bleue émise par ces luminaires DEL. La Ville de Montréal a alors demandé un avis de santé à la Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal (DRSP de Montréal) afin de connaître les risques que l'installation de ces luminaires de rue DEL pourrait représenter pour la santé. Pour y répondre, la DRSP de Montréal, en collaboration avec l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), a réalisé une revue de la littérature portant sur les effets de la lumière la nuit sur la santé ainsi qu'une évaluation de l'exposition des citoyens à la lumière bleue émise par les luminaires de rue DEL en vue d'évaluer le risque à la santé.

La lumière est l'un des principaux régulateurs des rythmes circadiens. La mélatonine, appelée aussi l'hormone du sommeil, est fréquemment utilisée comme un indicateur de la perturbation des rythmes circadiens. Or, même s'il est bien reconnu que la mélatonine est inhibée lors de l'exposition à la lumière, et particulièrement à la lumière bleue, aucune des études scientifiques répertoriées n'a démontré un effet néfaste sur la santé lié directement à l'inhibition de la mélatonine chez l'humain.

Suite à une analyse critique des études portant principalement sur le cancer du sein et les syndromes métaboliques, il apparaît que l'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure qu'il existe une relation de causalité entre l'exposition à la lumière la nuit et la survenue d'effets néfastes sur la santé.

Les calculs effectués indiquent que l'installation des luminaires de rue DEL à 4 000°K n'entraînera qu'une très faible augmentation de l'exposition des citoyens de la Ville de Montréal à la lumière bleue comparativement aux luminaires de rue HPS actuels. Il est à noter que les niveaux de lumière bleue des luminaires de rue DEL à 4 000°K sont comparables à ceux des luminaires de rue HM en place depuis plusieurs années sur certaines rues de Montréal.

De plus, l'exposition à la lumière bleue émise par les luminaires de rue DEL à 4 000°K est bien inférieure (au moins trois fois moindre) à l'exposition des résidents à la lumière bleue émise par les lampes intérieures - incandescentes, fluorocompactes, halogènes, DEL - qu'on retrouve actuellement dans les habitations. Étant donné que les citoyens passent une plus grande partie de leur soirée à l'intérieur qu'à l'extérieur de leur résidence, il est évident que l'exposition à la lumière bleue provenant des luminaires de rue DEL à 4 000°K est minime. Quant aux quantités de lumière bleue qui entrent à l'intérieur des maisons en provenance des luminaires de rue DEL, elles sont infimes.

Puisque le lien entre l'exposition à la lumière bleue la nuit et la santé n'est pas démontré et que la conversion aux luminaires de rue DEL à 4 000°K n'entraînera pas d'augmentation significative de l'exposition à la lumière bleue, nous considérons que le projet de conversion ne constitue pas un risque pour la santé de la population.

Cependant, la conception et l'installation d'un nouvel éclairage de rue doivent se faire en ayant recours aux meilleures pratiques dans le domaine afin d'assurer un éclairage de rue sécuritaire. Il sera important d'informer la population lors de l'implantation de cette nouvelle technologie. Il est possible qu'à certains endroits, des citoyens constatent des problèmes d'éblouissement, de lumière intrusive, de manque d'éclairage, etc., qui demanderont des modifications. Il sera alors nécessaire que la Ville de Montréal mette en place un système efficace de gestion des plaintes et qu'elle soit en mesure de corriger rapidement les situations qui nécessiteront des ajustements.

ANNEXE 1. ÉCLAIREMENT ET LUMINANCE DES SOURCES LUMINEUSES

Tableau 11. Niveaux d'éclairage et de luminance de différentes sources lumineuses

TYPE D'ÉCLAIRAGE	ÉCLAIREMENT (lux) ¹	LUMINANCE (cd/m ²)	SOURCE
Seuil de perception de l'œil		0,000001	Behar-Cohen et coll., 2011
Éclairage naturel			
Ciel de nuit	0,0003	0,0001	Behar-Cohen et coll., 2011
Ciel de nuit, pleine lune		2 000	Behar-Cohen et coll., 2011
Ciel nuageux	15 000		Behar-Cohen et coll., 2011
Ciel clair		5 000	Behar-Cohen et coll., 2011; Martinsons et Zissis, 2014;
Soleil, à midi, en été	100 000	1 600 000 000	Behar-Cohen et coll., 2011; Martinsons et Zissis, 2014
Feuille de papier blanc, sous le soleil, à midi, en été		30 000	Behar-Cohen et coll., 2011
Sable ou neige directement éclairé par le soleil		≤ 50 000	Behar-Cohen et coll., 2011
Éclairage extérieur			
Luminaires de rue - mesure dans la rue – Norme RP-8-14	4 à 17	0,3 à 1,2	IES, 2014
Éclairage public - incluant stationnement et enseignes	50		Behar-Cohen et coll., 2011
Luminaire de rue - maximum sous luminaire sans arbre - maximum sous luminaire avec arbre	5 – 10 0 - 5		Kinzey, 2016
Éclairage intérieur			
Ampoule incandescente de 75 W à une distance de 2 m	40		Behar-Cohen et coll., 2011; Kinzey, 2016
Ampoule incandescente dépolie		10 000 - 50 000	Behar-Cohen et coll., 2011
Ampoule fluorocompacte		5 000 - 10 000	Behar-Cohen et coll., 2011; Martinsons et Zissis, 2014
Tube fluorescent		5 000 - 10 000	Behar-Cohen et coll., 2011; Martinsons et Zissis, 2014; Kinzey, 2016
Ampoule DEL blanche alimentée par 1W et distribuant 100 lm		10 000 000 - 20 000 000	Martinsons et Zissis, 2014
Dans une pièce, face au mur blanc, à midi, en mars		10 000	Behar-Cohen et coll., 2011
Dans différentes pièces, éclairage ambiant, à l'œil - Salon - Salle de bain - Chambre	15 – 45 45 – 230 10 – 50		DRSP, 2016

TYPE D'ÉCLAIRAGE	ÉCLAIREMENT (lux) ¹	LUMINANCE (cd/m ²)	SOURCE
Appareils électroniques			
<i>Télévision</i>			
Écran		300	Behar-Cohen et coll., 2011
Écran – à l'œil			
- Lumières de la pièce éteintes	0 - 10		Kinzey, 2016
- Lumières de la pièce ouvertes	2 - 30		
Écran – à l'œil			
- Lumières de la pièce éteintes – à 1 m	0 – 1		DRSP, 2016
- Lumières de la pièce ouvertes – à 1 m	1 – 19		
<i>Ordinateurs de table</i>			
Écran, à 40 cm – à l'œil	19 - 34		DRSP, 2016
<i>Ordinateurs portables</i>			
Écran, à 40 cm, lumières éteintes – à l'œil	0 – 25		DRSP, 2016
<i>Tablettes et iPad</i>			
Écran, éclairage maximal – à l'œil	18 (±3,8)	1,4 - 184	Wood et coll., 2013
Écran, à distance de lecture à l'œil			
- Lumières de la pièce éteintes	0 – 5		Kinzey, 2016
- Lumières de la pièce ouvertes	15 - 45		
Écran, à 40 cm, lumières de la pièce éteintes - à l'œil	17		DRSP, 2016
<i>Téléphone intelligent</i>			
Écran, lumières de la pièce éteintes - à l'œil	25,4 – 58,3		Oh et coll., 2015
Écran, à distance de lecture – à l'œil			
- Lumières de la pièce éteintes	0 – 5		Kinzey, 2016
- Lumières de la pièce ouvertes	15 - 45		
Écran, intensité maximale, à 40 cm – à l'œil			
- Lumières de la pièce éteintes	1 – 10		DRSP, 2016
- Lumières de la pièce ouvertes	25		
<i>Liseuse électronique</i>			
Écran, éclairage max, à 40 cm – à l'œil	31,73		Chang et coll., 2015

¹ Il s'agit de l'éclairage horizontal (au sol ou sur des surfaces) à moins de spécifier un éclairage vertical (à l'œil).

ANNEXE 2. QUELQUES SCÉNARIOS D'INSTALLATION DE LUMINAIRES DEL DE LA VILLE DE MONTRÉAL

Le Tableau 12 présente les niveaux d'éclairement (lux) et de luminance (cd/m^2) prévus pour quatre scénarios de remplacement de luminaires de rue HPS (100 à 250 W) par des luminaires DEL à 4 000°K (53 à 132 W) sur le territoire de la Ville de Montréal, pour deux rues résidentielles, une artère et une grande artère. Les données d'éclairement vertical à l'œil présentées dans la dernière colonne du Tableau 12 sont utilisées afin de représenter l'exposition des citoyens à la lumière bleue lorsqu'ils circulent sur les trottoirs (section 6).

Tableau 12. Niveaux d'éclairage et de luminance de la chaussée et des trottoirs estimés dans quatre scénarios de remplacement de luminaire de rue HPS par des luminaires de rue DEL sur le territoire de la Ville de Montréal

Scénario	Lampadaire	Luminaire DEL à 4 000°K	Chaussée valeurs moyennes (minimum – maximum)			Trottoir valeurs moyennes (minimum – maximum)	
			Éclairage (lux)	Luminance (cd/m²)	Luminance de voile	Éclairage (lux)	
						Horizontal	Vertical à l'œil
Rue résidentielle Rue Leclaire (entre Hochelaga et de Rouen) LUMINAIRE HPS 100 W	Lampadaire piéton simple, sans vasque, en quinconce	LUMINAIRE DEL 55 W Type IV BUG B1-U0-G1 3 308 lumens	7,63 (3,2 - 21,9)	0,36 (0,2 - 1,0)	0,01 (0,00 - 0,16)	3,58 (0,7 – 17,7) 4,22 (0,9 – 22,6)	0,34 (0,0 – 1,9) 3,42 (0,0 à 25,0) 3,71 (0,0 – 25,3) 1,43 (0,0 – 3,7)
Rue résidentielle 41 ^e avenue (entre Beaubien et Bellechasse) LUMINAIRE HPS 150 W	Lampadaire de rue simple sur poteau de bois	LUMINAIRE DEL 53 W Type III BUG B1-U0-G1 5 800 lumens	7,74 (3,9 – 16,5)	0,36 (0,2 – 0,6)	0,01 (0,00 – 0,05)	3,76 (3,1 – 4,9)	2,37 (1,4 – 3,2) 1,74 (0,8 – 2,4) 2,78 (0,4 – 5,4) 3,58 (0,2 – 7,9)
Artère Rue St-Denis (entre Boucher et Laurier) LUMINAIRE HPS 200 W	Lampadaire de rue simple, vis-à-vis	LUMINAIRE DEL 88 W Type II BUG B2-U0-G1	18,99 (6,9 – 37,3) 18,44 (7,2 – 35,0)	1,02 (0,7 – 1,4) 1,01 (0,7 – 1,4)	0,10 (0,05 – 0,14) 0,09 (0,04 – 0,13)	5,86 (2,7 – 14,0) 5,75 (2,5 – 14,7)	2,83 (1,4 - 7,6) 2,62 (1,3 – 6,7)
Grande artère Boul. René-Lévesque (entre Mansfield et Robert-Bourassa) LUMINAIRE HPS 250 W	Lampadaire de rue double, dos à dos, dans le terre-plein	LUMINAIRE DEL 132 W Type IV BUG B3-U0-G2	24,34 (10,1 – 59,3) 22,12 (9,7 – 51,4)	1,27 (0,6 – 2,0) 1,17 (0,6 – 1,9)	0,09 (0,04 – 0,13) 0,09 (0,04 – 0,13)	10,14 (9,0 – 11,9) 10,42 (9,4 – 13,0)	7,67 (5,5 – 9,8) 7,73 (5,4 – 9,6) 7,96 (5,3 – 10,3) 7,99 (5,6 – 9,9)

Source : Ville de Montréal, 2016

ANNEXE 3. ÉVALUTION DE L'EXPOSITION AUX RADIOFRÉQUENCES ÉMISES PAR LE SYSTÈME DE GESTION À DISTANCE DE L'ÉCLAIRAGE DE RUE DEL

Zubek, 2016 a évalué l'exposition potentielle de la population aux RF émises par un des trois contrôleurs du système de gestion à distance de l'éclairage de rue DEL et s'est assuré du respect des normes du Code de sécurité 6 de Santé Canada en matière d'exposition aux RF (Santé Canada, 2015).

L'appareil évalué était le LitenodeTM Cabinet Gateway (Passerelle) qui émet dans la fréquence des 2,4 GHz et a une puissance rayonnée de 0,4 W. Les tests ont été faits à l'aide du logiciel *EMF Visual* qui permet de simuler la densité de puissance (W/m^2) des RF dans le champ proche et dans le champ éloigné de l'antenne en vue de la comparer avec les normes du Code de sécurité 6 de 5 W/m^2 pour la population en général.

Les résultats de cette analyse sont présentés au Tableau 13. L'exposition de la population générale aux RF, mesurée à 2 m de hauteur tout près d'un poteau portant un contrôleur est inférieure à 0,0005 W/m^2 (moins de 0,01% de la norme du Code de sécurité 6) (point A de la Figure 27). Même en étant placé à 10 cm de l'antenne du contrôleur, leur exposition serait inférieure à 0,25 W/m^2 (inférieure à 5% de la norme du Code de sécurité 6 pour la population en général) (point B de la Figure 27). Le seul endroit où la densité de puissance dépasserait la limite permise du Code de sécurité 6 est limité à l'antenne elle-même (supérieur à 31 W/m^2) (point C de la Figure 27). Dans son rapport, Zubek, 2016 recommande aux travailleurs d'éviter tout contact physique avec ces antennes en fonction et de maintenir une distance de 20 cm autour de celles-ci.

Tableau 13. Niveaux d'exposition aux RF autour des contrôleurs du système de gestion des luminaires de rue DEL

Lieu d'exposition aux RF autour du contrôleur (Figure 27)	Exposition aux RF	
	Niveaux d'exposition (W/m^2)	Proportion de la norme de 5 W/m^2 du Code de sécurité 6 qui s'applique à la population générale
Point A : À une hauteur de 2 m du sol et autour du poteau portant un contrôleur	< 0,0005	≤ 0,01 %
Point B : Zone située autour du contrôleur (hauteur de 6 m du sol)	< 0,25	< 5 %
Point C : Zone très près de l'antenne du contrôleur (hauteur de 6 m du sol)	> 31	Supérieur à la norme

Source : Zubek, 2016

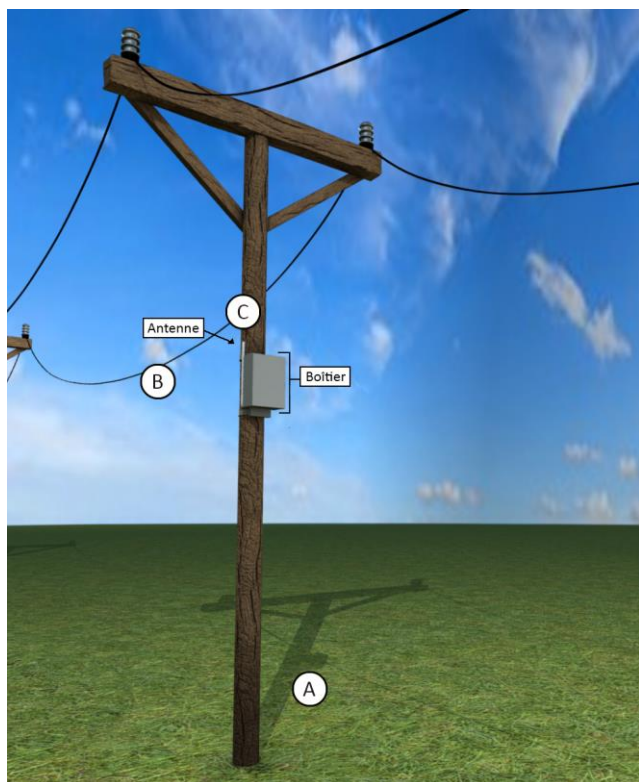


Figure 27. Localisation des points A, B et C situés près d'un contrôleur à distance des luminaires de rue DEL où ont été estimés les niveaux d'exposition aux RF

Source : Adapté de Zubek, 2016

ANNEXE 4. REVUE DE LITTÉRATURE LUMIÈRE LA NUIT ET SANTÉ

Revue systématique de la littérature

Dans le but de déterminer le risque à la santé associé aux luminaires de rue, nous avons effectué une revue systématique de la littérature portant spécifiquement sur les luminaires de rue. Étant donné qu'aucun article n'a été identifié dans cette revue de la littérature, la recherche a été élargie aux effets de l'exposition à la lumière la nuit.

Source de données bibliographiques

La recension des écrits a été faite parmi les publications scientifiques révisées par des comités de pairs, de même que parmi les rapports scientifiques publiés par les organisations dotées de programmes de qualité avec révision par des pairs tels que l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) français, l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC).

De plus, les bases de données documentaires suivantes ont été interrogées pour les années 2010 à 2016 (suite au rapport de l'IARC, 2010) : *Ovid sp (EBM Reviews - Cochrane Central Register of Controlled, Cochrane Database of Systematic Reviews, ACP Journal Club, Database of Abstracts of Reviews of Effects, Cochrane Methodology, Health Technology Assessment, NHS Economic Evaluation Database, Ovid MEDLINE(R)) et Pubmed.*

Stratégies de recherche

Pour la recherche dans les différentes bases de données, des combinaisons de différents mots-clés ont été utilisées: *light, circadian, melatonin, melanopsin, environmental exposure* et *health*. Des mots additionnels ont été ajoutés pour compléter la recherche documentaire (Tableau 14). Les publications jugées pertinentes, citées en référence dans les articles consultés, ont été considérées même lorsque datées d'avant 2010.

Tableau 14. Liste des termes utilisés pour les équations de recherche bibliographique

Mots-clés	Équivalents recherchés			
Light	<i>Blue light</i>	<i>SSL</i>	<i>Light at night</i>	
Circadian	<i>Chronodisruption</i>	<i>Biological clock</i>	<i>Sleep disruption</i>	
Melatonin				
Melanopsin	<i>Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells</i>	<i>Retinal photoreceptor</i>		
Environmental Exposure	<i>Outdoor</i>			
Health	<i>Cancer</i>	<i>Depression</i>	<i>Obesity</i>	<i>Metabolic syndrome</i>

Critères de sélection et d'exclusion des documents

Les documents présentant des résultats chez l'humain ont été considérés. Lorsque disponibles, plus de poids a été accordé aux méta-analyses par rapport aux études individuelles qu'elles contenaient. Les articles de revue générale sans présentation de données quantitatives et rédigés dans une autre langue que le français ou l'anglais, les lettres à l'éditeur et les résumés de conférence ont été exclus.

Historique et hypothèses physiologiques

Suite à la reconnaissance par la communauté scientifique du caractère multifactoriel des maladies chroniques, une des plus grosses études de cohorte prospective américaine, la *Nurse Health Study* (NHS), a été initiée par l'École de santé publique et l'École de médecine de l'Université Harvard en collaboration avec l'Hôpital Brigham and Women's, en 1976. Cette étude avait pour but premier d'enquêter sur les facteurs de risque majeurs des maladies chroniques chez les femmes. Plus de 120 000 femmes âgées entre 30 et 55 ans ont pris part à l'étude initiale.

Certains résultats parus à la fin des années 1980 ont, entre autres, montré une plus grande incidence de cancer du sein dans cette cohorte d'infirmières par rapport à la population générale. Puisque près de 60 % des femmes faisant partie de la cohorte travaillaient selon un horaire atypique impliquant au moins trois quarts de travail de nuit par mois, en plus des quarts de travail de jour et de soir (Schernhammer et coll., 2003), des liens ont été faits entre ce type d'horaire de travail et les risques de développer un cancer du sein. Ainsi, en 1987, Stevens a proposé l'hypothèse selon laquelle les taux plus élevés de cancer du sein dans les sociétés industrialisées seraient liés à une trop grande exposition à la lumière la nuit, responsable de la suppression de la mélatonine (Stevens, 1987). Selon cette hypothèse, la suppression de la mélatonine permettrait aux niveaux d'œstrogène d'augmenter, ce qui stimulerait le renouvellement des cellules souches épithéliales mammaires.

Une hypothèse plus récente propose que l'exposition à la lumière la nuit de façon répétée sur une longue période avec une variation dans l'horaire de travail, comme dans le cas des travailleurs par quarts, provoquerait le dérèglement de l'horloge biologique centrale (Petrov et coll., 2014) et, en conséquence, le dérèglement du contrôle des cycles cellulaires (Hastings et coll., 2008). Selon certaines études faites sur des souris en laboratoire, le dérèglement des cycles cellulaires serait associé au cancer puisqu'il affecterait les niveaux de transcription d'un nombre important de gènes impliqués dans l'homéostasie cellulaire et la génération de tumeurs (Gauger et Sancar, 2005; Ben Shlomo et Kyriacou, 2010; Ben Shlomo, 2014).

Finalement, l'hypothèse qui semble privilégiée actuellement, et depuis plusieurs années, incrimine la diminution de la sécrétion de la mélatonine comme facteur de risque possible du cancer. Comme la mélatonine neutraliserait les radicaux libres et réduirait l'initiation et la progression de la croissance tumorale (Blask, 2009), la diminution de sa production priverait les travailleurs de nuit de son effet oncostatique³⁰ présentement identifié chez les animaux et le risque de cancer s'en trouverait augmenté.

Toutes ces hypothèses ont grandement stimulé la recherche, tant au niveau des études animales que des études épidémiologiques, surtout depuis que le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), qui fait partie de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), a classé le travail par quarts impliquant la perturbation du rythme circadien comme cancérigène probable pour l'humain (groupe 2A) en 2007 (Straif et coll., 2007). En 2010, le CIRC a émis des recommandations de recherche afin d'approfondir l'évaluation du potentiel carcinogène du travail par quarts. Les besoins se divisaient en quatre volets : 1) une meilleure définition de ce que signifie le travail par quarts et des paramètres d'exposition qui y sont reliés; 2) des études portant sur les biomarqueurs impliqués dans la perturbation du rythme circadien chez les travailleurs de nuit; 3) une meilleure description des groupes contrôles et de leur exposition à la lumière pendant la nuit et 4) l'étude des effets des variations dans l'expression des gènes du rythme circadien sur le cancer chez les travailleurs de nuit. De plus, le besoin d'études visant à déterminer si le travail par quarts est associé à d'autres cancers en plus du cancer du sein, notamment les autres cancers hormono-dépendants dont le cancer de la prostate a été énoncé (Ward et coll., 2010).

³⁰ Qui freine le développement des tumeurs.

Cancer du sein

Cancer du sein - Travail par quarts

Au cours des cinq dernières années, sept méta-analyses ont été publiées sur le sujet (Travis et coll., 2016; Jia et coll., 2013; Lin et coll., 2015; Kamdar et coll., 2013; He et coll., 2015; Wang et coll., 2013; Ijaz et coll., 2013). Dans l'ensemble, ces méta-analyses visant à intégrer le risque rapporté par l'ensemble des études répertoriées en un seul estimé, présentent une association globale positive entre le cancer du sein et le travail par quarts, à l'exception de l'étude de Travis et coll., 2016 qui ne présentent pas d'association. Les études de Wang et coll., 2016 et Ijaz et coll., 2013 considèrent respectivement que pour chaque tranche de cinq années de travail par quarts supplémentaire, le risque de cancer du sein serait augmenté de 3 % (IC 95 % 1-5 %) et 5 % (IC 95 % 1-10 %). Les méta-analyses ayant examiné l'effet du travail par quarts sur une plus longue période de temps (> 8 ans) ne présentent pas un effet plus important que pour l'ensemble des travailleurs par quarts (Travis et coll., 2016; Jia et coll., 2013; Lin et coll., 2015; Kamdar et coll., 2013). Les méta-analyses semblent cependant être sujettes à des conclusions divergentes selon les devis analysés. Les estimés de risque compilés pour les études où le devis permettait d'assurer que l'exposition au travail par quarts était antérieure à la survenue du cancer du sein présentent des risques plus faibles et souvent statistiquement non significatifs, en comparaison avec les estimés de risque présentés dans les études ayant un autre devis (Jia et coll., 2013; Travis et coll., 2016; He et coll., 2015; Wang et coll., 2013). De façon générale, ces méta-analyses semblent présenter une plus faible association entre le travail par quarts et le cancer du sein.

À la lumière des études présentées plus haut, le type de travailleurs par quarts (horaire de nuit ou horaire alterné) pourrait correspondre à des niveaux de risque différents. La profession qui semble présenter le plus de risques pour le cancer du sein est celle d'agent de bord où le risque surpasse celui associé aux autres types de travail par quarts (He et coll., 2015; Kamdar et coll., 2013). Toutefois, il est important de noter que les agents de bord, en plus d'avoir un travail pouvant dérégler leurs rythmes circadiens en raison du travail de nuit et du décalage horaire, sont plus exposés à des rayons cosmiques qui peuvent également être à la source de cancers.

Cancer du sein - Études écologiques

Un premier type d'études répertoriées consiste en des études utilisant un devis écologique. Nous présentons une courte description de ces études et de leurs résultats principaux.

Afin d'interpréter adéquatement l'information fournie par les études écologiques, il importe de préciser qu'elles étudient les associations entre une exposition et un effet, à partir de données populationnelles agrégées. Il n'y a donc aucune information recueillie directement auprès des individus. Ces études sont sujettes à ce que l'on nomme un biais écologique, c'est-à-dire une association observée à une certaine échelle (ex. pays ou villes), mais qui ne correspond pas à l'association observée au niveau individuel (Rothman et coll. 2008). Ce biais associé au devis des études, et reconnu par les auteurs des articles suivants (Kim et coll., 2015; Kim et coll., 2016; Kloog et coll., 2008; Portnov et coll., 2016), empêche l'inférence à une relation causale entre la lumière la nuit et le cancer du sein. De plus, ces études sont par définition de nature transversale, c'est-à-dire qu'elles étudient, à un temps donné, les corrélations entre deux variables. Étant donné que l'hypothèse sous-jacente au développement du cancer en lien avec l'exposition à la lumière la nuit requiert une exposition sur une longue période de temps, un suivi longitudinal de sujets exempts de cancer est nécessaire pour attester d'une relation causale. Il est aussi impératif de caractériser l'exposition des sujets à la lumière. Un tel suivi et une telle caractérisation ne sont pas présents dans les études de type écologique.

Par ailleurs, dans ce type d'études, l'utilisation d'images satellitaires pour décrire l'exposition à la lumière la nuit présente aussi des limites quant aux conclusions qu'il est possible d'en tirer. Ces images captent l'irradiation de lumière visible provenant de la Terre et non l'exposition réelle des individus. Il a d'ailleurs été

démontré par Rea et coll. 2011, que les données issues des images satellitaires et les mesures faites dans plusieurs chambres à coucher de résidences de l'état de New-York n'étaient pas statistiquement corrélées. Ainsi, les données photométriques utilisées dans cette étude ne supportent pas l'hypothèse que les images satellitaires permettant de quantifier la lumière la nuit puissent prédire l'exposition lumineuse dans l'environnement de sommeil (Rea et coll., 2011).

De surcroît, les associations présentées par ces études ne prennent pas en considération l'exposition des sujets à l'intérieur de leur résidence. Étant donné que l'exposition intérieure durant la soirée devrait normalement être plus élevée que l'exposition extérieure en termes d'intensité et de durée (voir section 5), la considération de l'exposition intérieure est essentielle. Pour ces deux raisons, il est possible que l'exposition à la lumière la nuit estimée à partir d'images satellitaires ne corresponde pas à l'exposition réelle (biais de classification) et ce, pas seulement en raison d'une erreur sur la mesure. En fait, les technologies associées à l'éclairage de rue peuvent varier spatialement (entre les pays particulièrement) et influencer la quantité de lumière pouvant être captée par les satellites. Finalement, ces études sont également sujettes à la confusion, c'est-à-dire que si les modèles ne sont pas contrôlés adéquatement, il est possible que les associations attribuées puissent être expliquées par une autre variable (biais de confusion). C'est d'ailleurs une hypothèse apportée par Rea et coll., 2011 lorsqu'ils mentionnent que l'association statistique démontrée entre autres par Kloog et ses collègues, coïnciderait plutôt avec un ou plusieurs autres facteurs de risque du cancer du sein. Bien que les études tentent de contrôler pour plusieurs facteurs de confusion potentiels, elles le font souvent en omettant de prendre en considération la prédisposition génétique des populations (Kim et coll., 2015; Kim et coll., 2016; Kloog et coll., 2010; Portnov et coll., 2016) ainsi que leurs habitudes de vie (ex. alimentation et consommation d'alcool) (Kloog et coll., 2008; Kloog et coll., 2010; Portnov et coll., 2016; Rybnikova et coll., 2016).

Deux études écologiques évaluent le lien entre les niveaux de lumière la nuit mesurés par des images satellitaires et les nouveaux cas de cancers à l'échelle nationale (Kloog et coll., 2010; Rybnikova et coll., 2016). Alors que l'étude de Kloog et coll., 2010 se limite à comparer les images satellitaire de 1996-1997 aux taux de cancer du sein concomitants (1998-2002), l'étude de Rybnikova et coll., 2016 reproduit ces analyses en utilisant les taux de cancer de 2002 et 2012. Ces deux études présentent une association positive et statistiquement significative entre les nouveaux cas de cancer du sein au début des années 2000 et la moyenne nationale annuelle de lumière reflétée vers le ciel³¹. Ces études ont un devis transversal, c'est-à-dire qu'elles évaluent, à un temps donné, les corrélations entre deux variables. Étant donné que l'hypothèse sous-jacente au développement du cancer du sein en lien avec l'exposition à la lumière la nuit requiert une exposition sur une longue période de temps et implique une période de latence avant le diagnostic du cancer, un suivi longitudinal de sujets exempts de cancer du sein est nécessaire pour attester d'une relation causale. C'est dans le but de pallier à cette problématique que Rybnikova et coll., 2016 présente l'association entre les images satellitaires de 2002 et l'incidence de cancer du sein en 2012. Ceci indique donc que le taux de cancer en 2012 est positivement associé la lumière captée par les images satellitaires.

En plus de ces deux études examinant l'association entre le cancer du sein et la lumière la nuit à l'échelle nationale, quatre études examinent les relations écologiques à une échelle infranationale³² (Kim et coll., 2015; Kim et coll., 2016; Kloog et coll., 2008; Portnov et coll., 2016). Ces études présentent une association entre le cancer du sein et les images satellitaires. Alors que les études de Kim et coll., 2015, Kim et coll., 2016 et Kloog et coll., 2008 utilisent des régions administratives de taille assez élevée (pays ou comtés) pour effectuer leurs analyses, Portnov et coll., 2016 tiennent compte des secteurs de recensements pour l'état du Connecticut aux États-Unis. Cette dernière étude rapporte une association de 63 % (IC 95 % 41-89 %)³³ de développer le

³¹ Les facteurs suivants ont été contrôlés : la consommation nationale d'électricité, le taux de fertilité, le pourcentage d'individus vivant en milieu urbain et le produit intérieur brut (PIB) par personne.

³² Une échelle agrégée plus petite que la nation, par exemple régionale.

³³ Il est certain à 95% que le risque pour la population se situerait entre 41%-89%.

cancer du sein sur une période de 5 ans, entre le secteur le plus exposé et le moins exposé à la lumière la nuit selon des images satellitaires. Cette étude présente aussi les associations en fonction du groupe d'âge où les femmes développent le cancer du sein.

Cancer du sein - Études menées sur les individus

En plus des études de type écologique, on retrouve quelques études examinant l'association entre le cancer du sein et l'exposition à la lumière la nuit au niveau individuel (Wang et coll., 2016; O'leary et coll., 2006; Davis et coll., 2001; Keset-Sitton et coll., 2016A; Keset-Sitton et coll., 2016B; Kloog et coll., 2011; Hurley et coll., 2014; Brauer et coll., 2013; Li et coll., 2010). Plusieurs bémols doivent cependant être apportés à l'interprétation des résultats de ces études. Premièrement, l'utilisation d'images satellitaires place un doute sur la qualité de l'évaluation de l'exposition (section Cancer du sein - Études écologiques). Il est également possible que plusieurs de ces études n'aient pas été contrôlées parfaitement pour l'ensemble des facteurs pouvant expliquer la relation observée. Il est d'ailleurs à noter que de nombreuses études présentant des associations entre la lumière la nuit et le cancer du sein ne contrôlent pas les risques présentés pour l'histoire familiale de cancer du sein, pour certaines habitudes de vie (alimentation, consommation d'alcool ou tabagisme) ou pour certains facteurs de risque individuels (utilisation de contraceptifs oraux, nombre d'enfants ou durée de l'allaitement) (Wang 2016; Keset-Sitton et coll., 2016A; Keset-Sitton et coll., 2016B; Kloog et coll., 2011; Brauer et coll., 2013). Ainsi les associations présentées pourraient s'avérer erronées. De plus, à l'exception de Hurley et coll. 2014, l'ensemble des études sont rétrospectives. Les sujets doivent donc se remémorer leur exposition antérieure, laquelle a eu lieu 10 à 15 ans auparavant. Ce type d'étude est lié à un biais de rappel puisque les femmes se sachant atteintes d'un cancer du sein pourraient se remémorer plus adéquatement leur exposition antérieure ou rapporter une exposition qui ne représentait pas la réalité.

Deux de ces études utilisent les images satellitaires comme indicateur de l'exposition à la lumière la nuit. L'étude de Brauer et coll. 2013, conduites dans l'état de Géorgie aux États-Unis, présentent une association statistiquement significative avec le cancer du sein de 12 % (IC 95 % 4-20 %) lorsque le groupe le moins exposé est comparé au groupe le plus exposé à la lumière. Aucune association n'a été identifiée entre le groupe le moins exposé et le groupe d'exposition médian. À l'aide d'une étude de cohorte conduite en Californie et comprenant 106 731 femmes dont 5 095 ont été diagnostiquées d'un carcinome mammaire invasif, Hurley et coll., (2014) ont démontré une augmentation non statistiquement significative du risque de cancer du sein de 12 % (IC 95 % 0-26 %) pour le groupe vivant dans le secteur où le niveau de lumière extérieure était le plus élevé, en comparaison avec le groupe vivant dans le secteur où la lumière extérieure présentait le niveau le plus faible³⁴. L'association la plus forte a été observée entre l'incidence de cancer du sein chez les femmes préménopausées et l'éclairage extérieur le plus important (34 % (IC 95 % 7-69 %)).

Les autres études ont utilisé des questionnaires ou des interviews afin d'estimer l'exposition à la lumière durant la nuit. Parmi ces études on observe que les études de qualité supérieure, contrôlant pour un nombre suffisant de facteurs de confusion, ne présentent pas d'association entre la lumière et le cancer du sein.

Parmi ces dernières, l'étude cas-témoins (363 cas et 356 témoins) de Li et coll. 2010 menée dans l'état du Connecticut des États-Unis évalue également l'impact de la lumière provenant de l'intérieur et de l'extérieur de la résidence. Cette étude ne trouve aucune association statistiquement significative entre la lumière la nuit (intérieure ou extérieure)³⁵ et le cancer du sein. Des résultats similaires sont rapportés par l'étude cas-

³⁴ Les facteurs suivants ont été contrôlés : l'âge, l'ethnicité, l'histoire familiale de cancer du sein, l'âge aux premières menstruations, l'allaitement, l'accouchement, la ménopause, l'activité physique, l'IMC, la consommation d'alcool, la thérapie hormonale, le tabagisme, le statut socioéconomique du voisinage et le milieu urbain.

³⁵ Les facteurs suivants ont été contrôlés : l'âge, l'ethnicité, l'indice de masse corporelle, l'âge des premières menstruations, l'histoire familiale de cancer du sein, l'âge à la naissance du premier enfant, la durée de l'allaitement, le statut tabagique et la consommation d'alcool.

témoins (763 cas et 741 témoins) de Davis et coll. 2001, réalisée dans la région de Seattle. Dans cette étude, le cancer du sein n'est pas associé à l'ouverture des lumières durant la nuit³⁶. Ces résultats sont toutefois remis en question par l'étude de O'leary et coll., 2006 conduite à Long Island dans l'état de New York, où une association positive et statistiquement significative avec le cancer du sein est constatée. Cette augmentation du risque de 65 % (IC 95 % 2-169 %) n'est cependant identifiée que chez les femmes ayant deux réveils ou plus par nuit (avec ouverture de la lumière) et ceci deux fois ou plus par semaine. Dans le cas présent, il est difficile d'attribuer cette association aux réveils ou à la lumière³⁷. Dans l'étude de Hurley et coll., 2014, l'exposition à la lumière intérieure a aussi été évaluée par des indicateurs élaborés à partir des réponses données par des femmes à des questions telles que : « Au cours de la dernière année, avez-vous utilisé une lumière de forte intensité la nuit lorsque vous dormiez à la maison? ». Aucune association statistiquement significative n'a été mise en évidence entre l'intensité de la lumière la nuit à l'intérieur des résidences et le risque de cancer du sein.

Au niveau des études ne contrôlant pas l'ensemble des facteurs de confusion pertinents, l'étude de Wang et coll. 2016, qui vise à créer un modèle prédictif de cancer du sein en Chine à partir d'une étude cas-témoins (923 cas et 918 témoins), identifie l'évaluation de la lumière subjective la nuit comme un prédicteur du cancer du sein. De surcroît, l'étude cas-témoins (794 cas de cancer du sein et 885 témoins) conduite par Kloog et coll. 2011 en Israël présente un risque statistiquement significatif de cancer du sein en lien avec l'évaluation subjective de la luminosité dans la chambre à coucher suite à la réponse à un questionnaire. Néanmoins, aucune association n'a été identifiée pour les individus laissant leurs volets ouverts durant la nuit, ce qui permettait l'entrée de la lumière provenant de l'extérieur³⁸. En opposition à Kloog et coll. 2011, l'étude cas témoin de Keset-Sitton et coll., 2016a (93 cas et 185 témoins), également conduite en Israël, présente un effet protecteur associé à la fermeture des volets durant la nuit, mais aucune association avec l'exposition (de 10 à 15 ans avant le diagnostic) dans la chambre à coucher durant la nuit. Le fait de résider à proximité d'une source importante de lumière extérieure la nuit semble également être liée à l'augmentation de cancer du sein. Cette étude constate aussi l'effet protecteur de la lecture avant le coucher, ce qui semble être contradictoire face à l'hypothèse que la lumière induit ces effets. Cet effet protecteur est également rapporté dans les milieux ruraux et urbains d'Israël dans l'étude de Keset-Sitton et coll., 2016b (110 cas et 142 témoins). Quelques différences sont toutefois observées entre les milieux ruraux et urbains. La fermeture des volets serait entre autres un effet protecteur significatif sur le cancer du sein dans les milieux ruraux, contrairement aux milieux urbains. L'inverse est constaté pour le fait de résider à proximité d'une source importante de lumière extérieure. Cependant, dans les deux cas, la lumière à l'intérieur de la chambre à coucher ne semble pas associée au cancer.

Syndromes métaboliques

Parmi les études répertoriées sur le sujet, un total de quatre études porte sur la lumière la nuit et les syndromes métaboliques.

L'étude de Rybnikova et coll. 2016 a évalué statistiquement la présence d'une association entre l'éclairage extérieur et l'obésité. Par contre, elle est vulnérable à un biais écologique, où on infère que des corrélations observées sur un agrégat d'individus sont représentatives des corrélations au niveau individuel (section Cancer du sein - Études écologiques).

³⁶ Les facteurs suivants ont été contrôlés : le nombre d'enfants, l'utilisation de contraceptifs oraux, l'histoire familiale de cancer du sein et l'utilisation de thérapies de remplacement hormonal.

³⁷ Les facteurs suivants ont été contrôlés : l'âge, le nombre d'enfants, l'histoire familiale de cancer du sein, l'éducation ainsi que l'historique de maladie bénigne des seins.

³⁸ Les facteurs suivants ont été contrôlés : la religion, le nombre d'enfants, la consommation d'alcool et l'éducation.

D'autres études épidémiologiques s'attardent au lien entre la lumière dans la chambre à coucher et l'indice de masse corporelle (IMC). Ces études présentent toutefois certaines limites. En premier lieu, cette étude est de nature transversale, regardant à un temps donné les corrélations entre deux variables. Étant donné que l'hypothèse sous-jacente au développement de l'obésité en lien avec la lumière la nuit requiert une exposition sur une longue période de temps, un suivi longitudinal de sujets exempts d'obésité est nécessaire pour attester d'une relation causale. En second lieu, les données d'exposition et les IMC utilisés dans cette étude sont auto-rapportées, ce qui peut induire un biais de classification non différentiel. La présence de confusion résiduelle peut également occasionner un biais dans ces études.

L'étude de McFadden et coll. 2014, illustre une association positive entre le fait de dormir dans des conditions très lumineuses, en comparaison à conditions de lumière modérée ou faible, et le surpoids ou l'obésité³⁹. L'étude menée par Obayashi et coll. en 2013, chez 528 participants âgés de plus de 60 ans, montre que le groupe exposé à ≥ 3 lux en moyenne durant la nuit comporte plus de participants obèses ou ayant une dyslipidémie (concentration anormalement élevée ou diminuée de lipides dans le sang) que le groupe exposé à < 3 lux. Aucune association statistiquement significative n'est observée entre le diabète et l'exposition à la lumière durant le sommeil. L'excrétion de 6-sulfatoxymélatonine, le principal métabolite urinaire de la mélatonine, ne varie pas de façon statistiquement significative entre le groupe exposé à ≥ 3 lux en moyenne durant la nuit et celui exposé à < 3 lux. Cette dernière observation est intéressante puisqu'elle suggère que la suppression de mélatonine n'est pas le mécanisme sous-jacent à l'association entre l'accroissement de l'IMC et l'exposition à la lumière la nuit. Toutefois, les auteurs se limitent à des sujets âgés d'en moyenne 73 ans et les variables de contrôle n'incluent pas certaines comorbidités ou difficultés de mobilité possiblement présentes chez les sujets et pouvant les inciter par mesure de sécurité à avoir un éclairage nocturne plus élevé. De plus, comme pour l'étude de McFadden et coll., 2014, il s'agit d'une étude de nature transversale. L'étude de Koo et coll. 2016, basée sur 8 526 participants âgés entre 39 et 70 ans, a montré une association statistiquement significative entre l'exposition à la lumière et l'obésité, en comparaison au groupe peu exposé à la lumière⁴⁰. Néanmoins lorsque les associations sont examinées selon les groupes d'âge, les auteurs constatent que l'association persiste uniquement pour les individus les plus âgés (59-70 ans).

Autres effets sanitaires

Autres cancers

Peu d'études humaines ont évalué les associations entre le travail par quarts ou l'exposition à la lumière la nuit et d'autres types de cancer (prostate, colorectal). Parmi ces études, présentées plus bas, certaines ont pu démontrer la présence d'une association positive alors que d'autres n'ont pas montré d'association. Il semble que davantage de recherche soit nécessaire avant de pouvoir statuer sur la présence d'un risque associé à ces pathologies.

Certains auteurs ont considéré le dérèglement des rythmes circadiens comme facteur de risque possible du cancer de la prostate. Cependant, l'ensemble des études répertoriées sur le sujet ne permet pas de conclure avec certitude sur un tel risque. Par exemple, parmi les sept études épidémiologiques répertoriées sur le sujet, Kubo et coll., 2006 ont été les premiers à démontrer une association significative entre le travail par quarts et le cancer de la prostate. Leur étude s'est déroulée sur dix ans et incluait une cohorte de plus de 14 000 hommes âgés entre 40 et 65 ans, dont 31 ont été atteints du cancer de la prostate (Kubo et coll., 2006). Leurs résultats ont montré que les hommes qui travaillaient sur un horaire rotatif étaient

³⁹ Les facteurs suivants ont été contrôlés : l'âge, le tabagisme, la consommation d'alcool, le statut socioéconomique, la durée du sommeil, le fait d'avoir un enfant de moins de 5 ans, le fait d'avoir travaillé par quarts durant les 10 dernières années et la pratique d'activités physiques intenses.

⁴⁰ Les facteurs suivants ont été contrôlés : l'âge, le sexe, le niveau d'éducation, le type de résidence, la consommation d'alcool, le tabagisme ainsi que certains facteurs pouvant influencer la qualité du sommeil.

significativement à risque de développer un cancer de la prostate. Par contre, les hommes qui travaillaient sur un horaire fixe de nuit ne présentaient pas un risque plus élevé. En incluant les résultats de l'équipe de Kubo aux résultats de six autres études portant sur le travail par quarts de nuit et le risque de cancer de la prostate, l'équipe de Rao a pu démontrer, par une méta-analyse, une association positive (Rao et coll., 2015). Cependant, les auteurs mentionnent que l'interprétation de ces résultats doit être faite avec prudence puisque le nombre d'études incluses dans cette méta-analyse et la qualité des données d'exposition est faible et qu'il y a une grande hétérogénéité et une diversité de limitations méthodologiques entre les études.

Quelques études épidémiologiques ont montré une corrélation statistiquement significative entre le travail par quarts (Tsai et coll., 2014; Parent et coll., 2012) et le cancer colorectal, alors que d'autres n'ont pas réussi à démontrer cette corrélation (Schwartzbaum et coll., 2007; Schernhammer et coll., 2003; Tynes et coll., 1996). En considérant ces six études pour leur méta-analyse et en les classant selon l'échelle Newcastle-Ottawa⁴¹, l'équipe de Wang ont identifié le travail par quarts comme facteur de risque du cancer colorectal (Wang et coll., 2015). Cependant, les mécanismes sous-jacents ne sont pas connus et il n'est donc pas possible d'extrapoler ce facteur de risque à l'exposition à lumière la nuit.

Deux études écologiques ont examiné l'association entre l'exposition nocturne lumineuse provenant d'images satellitaires de différentes régions géographiques et les taux de cancers de ces régions (Kloog et coll., 2009; Rybnikova et coll., 2016b). Kloog et coll. ont utilisé des données sur le cancer de la prostate, du colon et du poumon provenant de la base de données GLOBOCAN 2002 et les ont comparées aux données d'exposition lumineuse selon la distribution géographique. Leurs résultats ont montré une association positive et statistiquement significative pour le cancer de la prostate seulement. Pour pallier à l'absence de suivi longitudinal, l'équipe de Rybnikova et coll., 2016b a repris la même méthodologie que l'équipe de Kloog et coll., 2009, mais en associant les images satellitaires de 2002 aux données d'incidence de cancer de la prostate de 2012. Leurs résultats ont aussi présenté une association positive et statistiquement significative, bien que la force de l'association puisse varier d'une région étudiée à l'autre. Bien que ces études tentent de contrôler pour plusieurs facteurs de confusion potentiels, elles le font souvent en ne prenant pas en considération la prédisposition génétique des populations ainsi que leurs habitudes de vie (ex. alimentation, consommation d'alcool, historique d'emploi). Ces études sont également sujettes à un biais écologique.

⁴¹ L'échelle Newcastle-Ottawa est issue de la collaboration entre l'Université de Newcastle, Australie et celle d'Ottawa, Canada. C'est un système d'étoiles développé pour évaluer la qualité des études non randomisées et aider à l'interprétation des résultats des méta-analyses de façon pratique. Ainsi, une étude est évaluée selon trois grandes perspectives : la sélection des groupes, leur comparabilité et la détermination de l'exposition ou du résultat d'intérêt pour les études cas-témoin ou de cohorte.

ANNEXE 5. EFFETS SUR L'ŒIL ET LA PEAU

Effets sur l'œil

Les rayonnements optiques tels que les rayonnements ultraviolets (UV), les rayonnements infrarouges (IR) et la lumière visible peuvent provoquer des effets sur l'œil. La longueur d'onde et l'intensité du rayonnement déterminent les structures oculaires qui peuvent être atteintes (ex. la cornée, le cristallin, la rétine). Les effets possibles des rayonnements optiques sont liés à l'absorption au niveau des différentes structures de l'œil (Figure 28) (ANSES, 2010, Behar-Cohen et coll., 2011; Richez et Lemarié, 2011).

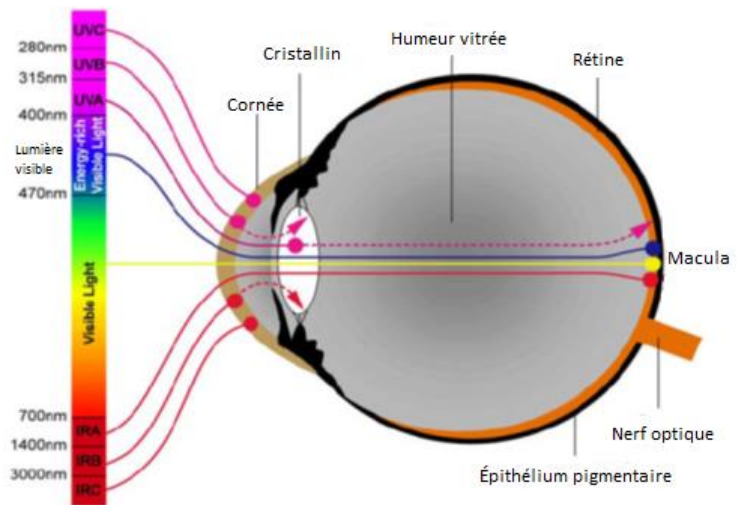


Figure 28. Illustration des différentes profondeurs de pénétration des rayonnements optiques dans l'œil selon la longueur d'onde

Source : Adapté de Martinsons et Zissis, 2014 et de Behar-Cohen et coll., 2011

Les UV (entre 100 nm à 400 nm) sont principalement absorbés par la cornée et le cristallin (Figure 28). L'exposition aux UV peut produire des lésions mineures et réversibles (exposition de courte durée), voire même des dommages permanents (exposition prolongée). Les IR de longueurs d'onde plus grandes que 1 400 nm sont principalement absorbés par la cornée et peuvent induire des brûlures de la cornée (Figure 28) (ANSES, 2010; Richez et Lemarié, 2011; Martinsons et Zissis, 2014). Cependant, les lumières DEL utilisées dans les applications d'éclairage émettent des quantités extrêmement faibles d'UV et d'IR. Par conséquent, il n'est pas attendu que l'éclairage aux DEL contribue à l'apparition d'effets liés à ces types de rayonnements (Martinsons et Zissis, 2014).

La lumière visible (380 nm à 780 nm) ainsi que les IR situés entre 780 nm et 1 400 nm atteignent la rétine⁴² (Figure 28) et peuvent induire des lésions rétinienne thermiques ou photochimiques irréversibles lors de très fortes expositions (ANSES, 2010; Martinsons et Zissis, 2014).

Les lésions rétinienne thermiques (rétinopathie thermique) apparaissent lors d'une exposition à des longueurs d'ondes entre 600 nm et 1 400 nm à de très forts niveaux d'éclairement énergétique conduisant à une élévation significative de la température de la rétine (ANSES, 2010; Richez et Lemarié, 2011; Martinsons

⁴² La rétine est particulièrement sensible aux longueurs d'onde dans le violet et le bleu (380 nm à 500 nm) (ANSES, 2010).

et Zissis, 2014). Or, les niveaux d'exposition produits par les DEL n'atteignent pas les seuils nécessaires pour produire des dommages thermiques à la rétine (Zissis, 2013; Martinsons et Zissis, 2014).

Les lésions rétiniennes photochimiques apparaissent après une courte exposition à une source intense ou après une exposition prolongée à de plus faibles niveaux d'exposition. Les dommages à la rétine induits par la lumière dépendent des caractéristiques du rayonnement (éclairage énergétique $[W/m^2]$ et longueur d'onde) et de la durée d'exposition (ICNIRP, 2013; Martinsons et Zissis, 2014; Jaadane et al, 2015).

Certaines personnes sont plus sensibles à la lumière. Les personnes aphakes (sans cristallin) ou pseudophakes (cristallin artificiel), les enfants (leur cristallin est plus transparent en comparaison à celui des adultes ce qui a pour effet que presque toute la lumière bleue traverse sans être filtrée), les personnes âgées (des dépôts photosensibilisants se forment et s'accumulent dans la rétine tout au long de leur vie), les personnes présentant une anomalie préexistante des yeux ou de la peau, les personnes qui consomment certains médicaments photosensibilisants (ANSES, 2010; Martinsons et Zissis, 2014).

Le risque photochimique lié à la lumière bleue peut être évalué en utilisant les lignes directrices de l'International Commission on Non-Ionising radiation Protection (ICNIRP). Pour la population générale, le spectre d'action du risque dû à la lumière bleue est donné par la fonction $B(\lambda)$ (courbe « Blue light » à la Figure 29). Le risque photochimique est évalué en calculant la luminance énergétique ($W/m^2/sr$) pondérée par la fonction $B(\lambda)$. Pour les jeunes enfants, les personnes aphakes ou pseudophakes, la luminance énergétique pondérée est calculée à l'aide de la fonction $A(\lambda)$ (courbe « Aphakic » à la Figure 29), qui tient compte de la transmission plus importante de la lumière bleue pour cette population sensible (ICNIRP, 2013).

Une évaluation du risque a donc été réalisée en se basant sur les valeurs limites d'exposition de l'ICNIRP et en utilisant des hypothèses conservatrices⁴³. Cette évaluation montre que l'exposition produite par l'éclairage de rue utilisant des luminaires DEL est largement en dessous des seuils de dommages photochimiques sur la rétine pour la population générale et pour les personnes aphakes.

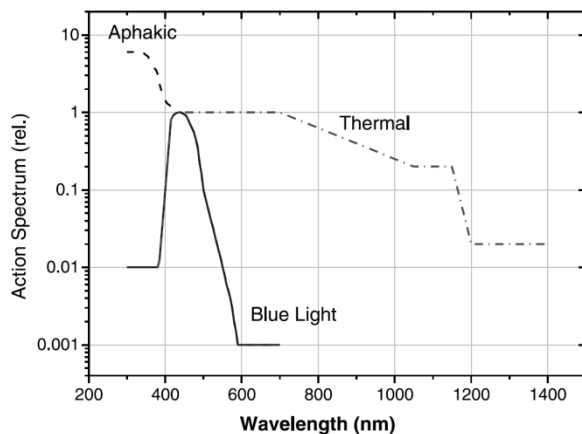


Figure 29. La courbe « *Blue light* » (fonction $B(\lambda)$) représente le spectre d'action de la lumière bleue sur la rétine pour la population générale. La courbe « *Aphakic* » (fonction $A(\lambda)$) représente le spectre d'action de la lumière bleue pour les personnes aphakes.

Source : ICNIRP, 2013

⁴³ Luminaire DEL de 4 000°K, cas d'une source de petite taille dont la lumière produirait un éclairage lumineux de 100 lux à l'œil pour une durée d'exposition de 100 s.

Effets sur la peau

De façon générale, la lumière visible peut endommager la peau selon son intensité et ses caractéristiques spectrales. Ces dommages sont possibles suite à l'exposition à un très grand éclairement énergétique engendrant une blessure thermique ou encore à la consommation de substances photosensibilisantes⁴⁴ (ANSES, 2010; ICNIRP, 2013).

Toutefois, il n'est pas attendu que l'exposition à l'éclairage de rue DEL produise des effets sur la peau compte tenu de la distance d'exposition entre les luminaires et la population et des faibles niveaux d'éclairement énergétique que cette distance engendre.

Calcul du risque photochimique pour la rétine (*blue light hazard*)

Pour réaliser le calcul, plusieurs hypothèses ont été émises. Dans tous les cas, ces hypothèses sont conservatrices, c'est-à-dire que les simplifications introduites ont pour effet d'accentuer le risque calculé.

Premièrement, l'ensemble de la lumière émise par le luminaire provenait d'une seule source de faible taille, ayant une taille angulaire de moins de 0,011 rad, a été prise en compte.

Deuxièmement, un éclairement lumineux uniforme de 100 lux à l'endroit où l'œil d'une personne serait situé a été retenu.

Le flux énergétique spectral a d'abord été obtenu avec une résolution de 5 nm, soit la résolution des données sur le risque photochimique fournies par l'ICNIRP (2013).

Une règle de proportionnalité a permis de calculer le flux énergétique spectral que devrait avoir un luminaire qui produirait un éclairement lumineux de 100 lm à l'aide du flux énergétique spectral d'un luminaire donné $[\varphi_e(\lambda)_{5nm}(\lambda)]$ ⁴⁵, de l'efficacité lumineuse spectrale relative photopique $[V(\lambda)]$ et de l'efficacité lumineuse spectrale maximale photopique $[K_m]$.

$$\varphi_V = K_m \int_{380}^{780} \varphi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Par la suite, l'éclairement énergétique ajusté (*effective radiance*) a été calculé dans le cas de la population générale (courbe $B(\lambda)$ de l'ICNIRP [2013]) et dans le cas aphake (courbe $A(\lambda)$ de l'ICNIRP (2013)). Ce calcul a été réalisé à l'aide de l'équation 10 de l'ICNIRP (2013), adaptée ci-dessous pour calculer l'éclairement énergétique ajusté plutôt que la radiance ajustée.

$$\varphi_{e \text{ ajusté}}(\lambda) = \sum_{300}^{700} \varphi_e(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Les valeurs obtenues ont été comparées à la valeur limite d'exposition pour une source de petite taille lors des expositions de plus de 100 s, soit 1 W/m^2 . Dans tous les cas, les éclairages énergétiques ajustés calculés étaient largement en dessous de la valeur limite d'exposition.

⁴⁴ La photosensibilisation est généralement plus importante pour les UV (ANSES, 2010).

⁴⁵ Un luminaire DEL 108 W ayant une température de couleur de 4 000°K et un flux lumineux total de 9 980 lm a été utilisé pour les calculs.

ANNEXE 6. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DE MESURE DE L'ÉCLAIREMENT DE LA DRSP

La DRSP a effectué les mesures d'éclairement sur la rue, sur les trottoirs et à l'intérieur de résidences. Toutes les mesures ont été effectuées « à l'œil » c'est-à-dire en plaçant le capteur de l'appareil de mesure à la hauteur de l'œil d'une personne de taille moyenne, soit à environ 1,5 m du sol.

À l'intérieur des résidences, les mesures ont été effectuées dans les différentes pièces (salon, salle de bain et chambre à coucher) ainsi que lors de la lecture d'un livre papier éclairé par des lampes intérieures.

Les appareils de mesure utilisés :

- Un luxmètre de marque AEMC Instruments, modèle CA813 (certificat de calibration 191783).
- Un radiomètre X1-3 de marque Gigahertz-Optik (certificat de calibration 17779-01)

ANNEXE 7. CALCUL DE LA PUISSANCE DE LUMIÈRE BLEUE

Les données de la section 6 présentent les niveaux d'exposition à la lumière bleue d'une personne se déplaçant sur le trottoir d'une rue éclairée par des luminaires de rue et d'une personne qui lit un livre éclairé par des lampes intérieures pour une période de temps équivalente, de même que l'exposition à la lumière bleue d'une personne présente pour la nuit dans sa chambre à coucher, lampes intérieures éteintes et rideaux fermés.

Pour chacune des sources de lumière utilisées, le flux énergétique spectral (W/nm), fourni par la Ville de Montréal (luminaires de rue) ou par la Banque de données spectrales d'ampoules d'usage domestique et public du CEGEP de Sherbrooke (lumières intérieures) (Roby et coll, 2016), est transformé en flux lumineux spectral photopique [Φ_v]. Pour ce faire, le flux énergétique spectral [$\Phi_e(\lambda)$], l'efficacité lumineuse spectrale relative photopique [$V(\lambda)$] ainsi que l'efficacité lumineuse spectrale maximale photopique [K_m] ont été utilisés.

Pour chaque scénario, une règle de proportionnalité a été utilisée pour trouver le flux énergétique spectral nécessaire pour qu'une lampe donnée produise le flux lumineux souhaité sur une surface d'1 m².

Le flux énergétique obtenu ne représente donc pas le flux énergétique qui entrerait dans l'œil d'une personne, mais bien la quantité de lumière nécessaire pour produire l'éclairement lumineux considéré.

Pour tous les types de lampes et pour tous les éclairagements lumineux considérés, le flux énergétique présent sur l'ensemble de cette surface a été comparé à ceux des autres scénarios. Ces estimations du flux énergétique ont été réalisées pour les longueurs d'ondes entre 405 et 530 nm, de même qu'entre 380 et 580 nm.

De plus, pour obtenir le pourcentage de lumière bleue d'une source, le rapport entre le flux énergétique total présent entre 405 et 530 nm et le flux énergétique total présent entre 380 et 780 nm a été fait.

Dans une dernière série de calculs, le flux énergétique spectral a été pondéré par le spectre d'action de la suppression de la sécrétion de la mélatonine présenté dans la norme DIN V 5031-100:2009-06. Les données de flux énergétique obtenues doivent cependant être interprétées avec soin. Le spectre d'action de la suppression de la sécrétion de la mélatonine n'est pas bien établi et de nombreux autres facteurs doivent être pris en compte pour évaluer l'inhibition de la sécrétion de mélatonine (voir section 5.2.2). La valeur de flux énergétique total pondéré obtenu permet cependant une comparaison supplémentaire allant au-delà de la simple sélection d'une plage de longueurs d'onde d'intérêt.

Le tableau ci-après présente les données que la Ville de Montréal a fournies concernant les caractéristiques des luminaires de rue retenus dans les scénarios d'exposition présentés à la section 6. Ces données ont été utilisées afin de produire les graphiques présentés à la Figure 26 et à la Figure 30.

Paramètres	HPS 150 W à 2 100°K	Halogénures métalliques 150 W à 3500°K	DEL 88 W à 4 000°K	HPS 250 W à 2 100°K	DEL 108 W à 4 000°K
Fixture	M2AC	M2AC	ERL1	M2AC	ERL1
Température de couleur (°K)	2100K	3500K	4000K	2100K	4000K
Puissance (Watt)	150 (Lampe)	150 (Lampe)	88 (Système)	250 (Lampe)	108 (Système)
Source lumineuse	LU150	MXR150	Nichia 757	LU250	Nichia 219C
Valeurs mesurées					
Tension (volt)	57,2	91,8	120	120,57	120,06
Courant (ampère)	3,125	1,943	0,739	2,486	0,887
Puissance (Watt)	149,9	149,7	88,42	250,5	105,82
PF	0,8313	0,8395	0,9975	0,8358	0,9939
THD	9,454	16,893	6,673	9,453	7,394

CCX	0,5193	0,4164	0,376	0,5292	0,3777
CCY	0,4215	0,3903	0,3731	0,4107	0,379
Flux lumineux (lumen)	10789	8973	8377	19332	11645
Température de couleur (oK)	2115	3263	4098	1964	4092
Indice de rendu de couleur	20,2	55,6	73,3	31,7	73,7
DUV	0,0022	-0,0024	-0,0004	-0,0003	0,0019
Longueur d'onde (nm)	Flux énergétique (W)				
380	0,0044262490	0,02174409	0,0006331565	0,007886371	0,001178214
381	0,0051583030	0,02080436	0,0006531540	0,007103696	0,001113080
382	0,0051607630	0,02344144	0,0007659463	0,008776668	0,001025700
383	0,0056229600	0,02437580	0,0005753083	0,009508298	0,001258938
384	0,0062311520	0,02386224	0,0006776290	0,009021222	0,001041478
385	0,0053545110	0,02287126	0,0005759138	0,007957933	0,000991466
386	0,0057037230	0,02348914	0,0005870243	0,008520038	0,001156567
387	0,0054455680	0,02420032	0,0006940826	0,009062837	0,001022334
388	0,0060456800	0,02367350	0,0006647069	0,008647369	0,000932588
389	0,0065890710	0,02297393	0,0006617855	0,008793349	0,000914735
390	0,0060049780	0,07222136	0,0005920703	0,008729679	0,001049884
391	0,0060705920	0,13243820	0,0006710336	0,008484682	0,000925263
392	0,0058978010	0,10102000	0,0005924884	0,009950331	0,001239597
393	0,0062034550	0,09484010	0,0006810886	0,009246879	0,001203494
394	0,0062969530	0,08489415	0,0007653467	0,010674900	0,001336689
395	0,0065056340	0,05945086	0,0006957632	0,009642608	0,001425311
396	0,0068767810	0,07086144	0,0007874158	0,010091330	0,001566017
397	0,0064538800	0,04719030	0,0007785166	0,010902570	0,001590040
398	0,0068253000	0,03299249	0,0008731548	0,010596670	0,001806896
399	0,0072413930	0,04492912	0,0009562341	0,011433570	0,001945609
400	0,0071117770	0,04299877	0,0010958550	0,010861350	0,002210871
401	0,0076287850	0,04850310	0,0011495040	0,011067100	0,002353950
402	0,0074393180	0,15622440	0,0012888920	0,011689980	0,002630099
403	0,0077996120	0,13851990	0,0014137520	0,012371360	0,002863935
404	0,0083670220	0,17183110	0,0015601180	0,014548250	0,003331124
405	0,0090497830	0,20486710	0,0018277100	0,014667240	0,003798218
406	0,0087123520	0,12445270	0,0020319240	0,013977520	0,004196623
407	0,0087027750	0,09050801	0,0023296940	0,014397130	0,005023781
408	0,0089616860	0,11291020	0,0026150770	0,013738510	0,005662813
409	0,0086561460	0,08387318	0,0029622600	0,013797280	0,006588991
410	0,0085979210	0,05661894	0,0034233890	0,014659960	0,007538852
411	0,0094146930	0,03705031	0,0039983140	0,014803410	0,008723371
412	0,0091457800	0,02612406	0,0045460150	0,015390930	0,010037500
413	0,0093162620	0,04908201	0,0052424330	0,016001190	0,011618130
414	0,0097837810	0,06784620	0,0060226930	0,016089970	0,013515330
415	0,0099073910	0,08342743	0,0068744250	0,016373790	0,015511310
416	0,0103130100	0,09519789	0,0078526400	0,016986800	0,017999120
417	0,0100606500	0,07514100	0,0089170490	0,017909920	0,020652480
418	0,0108607000	0,04772949	0,0102576300	0,017846860	0,023761050
419	0,0110144100	0,03713426	0,0115273100	0,018635050	0,027224090
420	0,0110769000	0,03187262	0,0129741900	0,019291230	0,031151600
421	0,0118841500	0,04058646	0,0148239400	0,020572060	0,035761080
422	0,0117677400	0,04578056	0,0165725400	0,020594900	0,040713820
423	0,0120484500	0,06530339	0,0185496700	0,021336100	0,046124300
424	0,0122480700	0,10590270	0,0207163300	0,021362620	0,051670420
425	0,0126129700	0,10134210	0,0233406100	0,021962130	0,058402980
426	0,0126520200	0,05642500	0,0261626100	0,022294250	0,065282420

427	0,0128672000	0,03793135	0,0289718600	0,023245670	0,072661880
428	0,0129552800	0,03566418	0,0320822700	0,023840250	0,080052690
429	0,0132804600	0,03688640	0,0355655000	0,023887270	0,087530940
430	0,0138017000	0,03678089	0,0393564600	0,024474490	0,094979380
431	0,0144996300	0,08041209	0,0431089400	0,026193920	0,102620900
432	0,0156162100	0,11265000	0,0475202400	0,028135330	0,109785400
433	0,0156947700	0,06680392	0,0516091200	0,029451020	0,117258200
434	0,0152414000	0,05492358	0,0564949000	0,028315370	0,124597000
435	0,0161024200	0,16757070	0,0610087500	0,029867890	0,131783000
436	0,0180017100	0,32417120	0,0657128800	0,032923740	0,139279100
437	0,0174180500	0,17692740	0,0709344600	0,031843830	0,148441500
438	0,0182767000	0,09395648	0,0757390200	0,034134070	0,155471000
439	0,0204890500	0,05875783	0,0814134200	0,039307800	0,165926700
440	0,0199938600	0,06654702	0,0870342100	0,038579470	0,174269700
441	0,0175015600	0,06268777	0,0918542700	0,032732520	0,182824300
442	0,0156414000	0,05366639	0,0978893800	0,030501110	0,192897000
443	0,0131575800	0,04459222	0,1031531000	0,025724020	0,201263000
444	0,0116212000	0,03777836	0,1100403000	0,022976970	0,208626700
445	0,0123349300	0,03267406	0,1158992000	0,024902790	0,213483700
446	0,0149439500	0,02729351	0,1227705000	0,029815030	0,214910600
447	0,0186339700	0,02477485	0,1304640000	0,035479260	0,215618600
448	0,0222214200	0,02859715	0,1366183000	0,041085900	0,210422100
449	0,0316810100	0,02969741	0,1436755000	0,060390400	0,204206400
450	0,0386741800	0,02776869	0,1495379000	0,073790480	0,193918000
451	0,0318152200	0,02678745	0,1547198000	0,060337730	0,180161200
452	0,0231997300	0,02915616	0,1577702000	0,046471720	0,166391600
453	0,0183895000	0,03018501	0,1604691000	0,039748580	0,151682200
454	0,0203679400	0,03966552	0,1597428000	0,043960330	0,137956000
455	0,0185421400	0,03990333	0,1568247000	0,040856040	0,124839900
456	0,0124977000	0,03866424	0,1523565000	0,030221580	0,112716500
457	0,0101200700	0,04370183	0,1453332000	0,024754780	0,102852700
458	0,0090873060	0,03235331	0,1382542000	0,022537170	0,094424080
459	0,0092217210	0,02903055	0,1301538000	0,021866320	0,087555130
460	0,0098528640	0,03284356	0,1203679000	0,022147380	0,081468550
461	0,0113838300	0,03072640	0,1109093000	0,024149120	0,076678450
462	0,0150551500	0,01724486	0,1021421000	0,028473950	0,071961030
463	0,0187037500	0,01463891	0,0937549800	0,035184250	0,067739800
464	0,0210070600	0,01571747	0,0863336100	0,039577670	0,063780330
465	0,0313661100	0,01695139	0,0803316500	0,055217820	0,060039390
466	0,0633727800	0,02587154	0,0743629000	0,112493100	0,056276120
467	0,0948192700	0,04198069	0,0693329300	0,171400200	0,052612310
468	0,0693977500	0,03243566	0,0648188900	0,120192600	0,049358590
469	0,0395380400	0,02277981	0,0606124200	0,072735240	0,046086320
470	0,0260134300	0,03267325	0,0569551600	0,056288970	0,043444470
471	0,0198294000	0,06787644	0,0531238300	0,047488560	0,040792420
472	0,0156845200	0,07002598	0,0496772500	0,039374430	0,038515420
473	0,0129667200	0,21715340	0,0461646800	0,031182350	0,036452830
474	0,0137911000	0,36530650	0,0431232700	0,029548890	0,035085940
475	0,0321510900	0,18809080	0,0401670200	0,057562570	0,034026180
476	0,0210299900	0,05853476	0,0373257900	0,035170620	0,032995660
477	0,0090488740	0,03117961	0,0348084800	0,016190120	0,032241870
478	0,0063467520	0,05853272	0,0326325000	0,011742260	0,032009330
479	0,0056186690	0,03845016	0,0305460400	0,010739870	0,031623900
480	0,0055074180	0,02095330	0,0287163500	0,010410420	0,031355110

481	0,0055205300	0,01808547	0,0272966000	0,010280660	0,031376550
482	0,0055941660	0,02226956	0,0261203100	0,010618410	0,031680950
483	0,0057323290	0,04617576	0,0251221400	0,010811690	0,031959880
484	0,0058421680	0,06721967	0,0244892400	0,010705750	0,032200590
485	0,0060988700	0,04912793	0,0238222400	0,011074890	0,033000370
486	0,0062693620	0,02433676	0,0235601900	0,011827540	0,033700430
487	0,0065480610	0,01812730	0,0231932600	0,012099290	0,034672830
488	0,0072142960	0,02675193	0,0233904100	0,012792320	0,036037620
489	0,0084435090	0,02320876	0,0233841000	0,014286990	0,037496280
490	0,0103186200	0,02238618	0,0234621700	0,016701480	0,038998440
491	0,0142013500	0,03532621	0,0237252800	0,022166100	0,041008000
492	0,0138862100	0,03359145	0,0242906600	0,022135230	0,043347650
493	0,0120595900	0,02840945	0,0249830900	0,019246980	0,045721230
494	0,0140633100	0,03437613	0,0257977800	0,022257780	0,048567110
495	0,0215472200	0,04495491	0,0269160300	0,031408440	0,051497640
496	0,0449967900	0,03043363	0,0280061600	0,064082350	0,054425460
497	0,1294923000	0,04946699	0,0293315400	0,205013100	0,057588910
498	0,2971855000	0,10367230	0,0308297300	0,504846000	0,060768000
499	0,2211798000	0,08455852	0,0326688300	0,350559000	0,064199120
500	0,0878184700	0,03488710	0,0343436100	0,124574500	0,067793580
501	0,0368595000	0,03037897	0,0365160200	0,051534880	0,071413170
502	0,0203755100	0,05510891	0,0386370800	0,029825270	0,074907430
503	0,0142341900	0,05297183	0,0411179000	0,022505950	0,078701180
504	0,0112599900	0,02751016	0,0435063200	0,019134830	0,082276010
505	0,0100047800	0,02273825	0,0461001100	0,017344170	0,086008710
506	0,0090020340	0,08648212	0,0484827200	0,016347260	0,089722440
507	0,0082206790	0,18805800	0,0513868900	0,015633810	0,093284730
508	0,0082033940	0,52659410	0,0540786000	0,015698340	0,096702400
509	0,0082410480	0,35698550	0,0571025800	0,015925810	0,100608300
510	0,0080155440	0,18977230	0,0599874100	0,015595960	0,104074900
511	0,0078928980	0,09528360	0,0628548100	0,015145130	0,107443300
512	0,0078419740	0,04488358	0,0658941000	0,015690160	0,111100900
513	0,0085336350	0,01892795	0,0683517100	0,016572120	0,114085900
514	0,0279126800	0,01605557	0,0712618200	0,048889150	0,116638900
515	0,0954654200	0,02391726	0,0741510400	0,156327600	0,120132400
516	0,0421181800	0,01634032	0,0770261100	0,066715860	0,122981300
517	0,0133892700	0,01153476	0,0796417300	0,023721980	0,125887800
518	0,0088542100	0,01061856	0,0821277500	0,017540180	0,128404100
519	0,0082645840	0,01218459	0,0850618400	0,016489810	0,131036900
520	0,0078260350	0,02832002	0,0873530500	0,016066820	0,133790500
521	0,0076895200	0,06256129	0,0898131700	0,015912060	0,135635100
522	0,0076787980	0,04253629	0,0922068900	0,015862500	0,137970700
523	0,0078624200	0,02047260	0,0940191100	0,016181120	0,139919600
524	0,0081758080	0,01646669	0,0964833400	0,016705820	0,142236600
525	0,0081930370	0,03319090	0,0984359500	0,016918790	0,144224100
526	0,0082458600	0,03150133	0,1000881000	0,016829430	0,146264000
527	0,0081279920	0,01503336	0,1023580000	0,016758520	0,147291600
528	0,0083095630	0,03904029	0,1038012000	0,017025970	0,149005400
529	0,0084463640	0,02593244	0,1053811000	0,017864850	0,150773300
530	0,0087400270	0,02141967	0,1073963000	0,018049400	0,152581600
531	0,0087855770	0,01637020	0,1087836000	0,018093670	0,153878400
532	0,0087829860	0,01977331	0,1104892000	0,018140400	0,154998500
533	0,0090626520	0,04165202	0,1115461000	0,018487680	0,156867900
534	0,0091879490	0,11876090	0,1130256000	0,019166230	0,158102400

535	0,0093110470	0,19053560	0,1141999000	0,019069410	0,158975400
536	0,0098209340	0,07929766	0,1157182000	0,019762510	0,160696300
537	0,0099351110	0,06805477	0,1165301000	0,020461250	0,161061400
538	0,0104255400	0,04835869	0,1175683000	0,021024050	0,162382700
539	0,0109432300	0,08575633	0,1189049000	0,021652950	0,163213300
540	0,0112619400	0,03513081	0,1198001000	0,022451940	0,164594400
541	0,0116733700	0,02629715	0,1207516000	0,023690070	0,165692300
542	0,0123151300	0,03275222	0,1217609000	0,024652960	0,166769200
543	0,0130273200	0,05101763	0,1230594000	0,026071700	0,168241400
544	0,0141554700	0,09454203	0,1238976000	0,028450940	0,168740100
545	0,0169233500	0,23159310	0,1250050000	0,034185140	0,169794500
546	0,0221971100	0,58374370	0,1258888000	0,044731260	0,171033900
547	0,0232570500	0,23520640	0,1271751000	0,047151410	0,171876900
548	0,0294712600	0,26400800	0,1274501000	0,059715540	0,172569200
549	0,0396625200	0,09704763	0,1286001000	0,083075350	0,173808500
550	0,0517974300	0,04076289	0,1294689000	0,107816300	0,174567100
551	0,0604195200	0,14264290	0,1298557000	0,125030700	0,175773000
552	0,0657925800	0,17635180	0,1309396000	0,133357700	0,176546600
553	0,0668120000	0,07206368	0,1313450000	0,134059400	0,177700900
554	0,0626580300	0,04400668	0,1323127000	0,127417300	0,179206600
555	0,0616451700	0,03782849	0,1330223000	0,124850400	0,179393500
556	0,0627246100	0,03915621	0,1338881000	0,127135000	0,180572000
557	0,0652143900	0,02848448	0,1350093000	0,130562200	0,182050400
558	0,0680548800	0,02693452	0,1358478000	0,136253900	0,183030900
559	0,0721211700	0,04403490	0,1364911000	0,143066400	0,184529800
560	0,0760596900	0,02714396	0,1370315000	0,149515500	0,184855600
561	0,0804817100	0,02204086	0,1378323000	0,157443300	0,186038200
562	0,0856774700	0,02232047	0,1387273000	0,166157600	0,186990600
563	0,0926773800	0,02425200	0,1395527000	0,178177200	0,188682400
564	0,1038165000	0,03563053	0,1398904000	0,195033400	0,189021300
565	0,1301920000	0,04486394	0,1408235000	0,231947400	0,190469500
566	0,2082087000	0,08187246	0,1414405000	0,339874900	0,190873900
567	0,3644098000	0,25213860	0,1421114000	0,587981200	0,192167800
568	0,8329506000	0,38068890	0,1425832000	1,409997000	0,193105100
569	0,9115764000	0,36889750	0,1430163000	1,477481000	0,193878200
570	0,4706654000	0,29081830	0,1438665000	0,747280500	0,195549200
571	0,2623572000	0,28671630	0,1444369000	0,441655500	0,195848200
572	0,1940940000	0,15763610	0,1446634000	0,353468700	0,197105300
573	0,1831900000	0,06205643	0,1451196000	0,347517500	0,197301000
574	0,1900099000	0,03704873	0,1459304000	0,366915800	0,198689600
575	0,2046012000	0,04269121	0,1460619000	0,397508600	0,198943400
576	0,2250945000	0,16973460	0,1464595000	0,437624500	0,199692200
577	0,2508384000	0,21024800	0,1467783000	0,484223200	0,200211500
578	0,2807859000	0,17953230	0,1465177000	0,536905600	0,200272600
579	0,3186233000	0,22124700	0,1469927000	0,600556600	0,201000400
580	0,3640739000	0,09407014	0,1470639000	0,674170900	0,201726000
581	0,4162394000	0,04922368	0,1475054000	0,748117800	0,201808700
582	0,4737487000	0,03467226	0,1474475000	0,822604200	0,201741300
583	0,5312490000	0,03297094	0,1473266000	0,872661600	0,202209500
584	0,5687816000	0,03615730	0,1472649000	0,862018300	0,202349000
585	0,5417011000	0,04523015	0,1473782000	0,710658700	0,202189500
586	0,3875780000	0,07015355	0,1470540000	0,406013100	0,202170700
587	0,1620759000	0,20374960	0,1467786000	0,141647900	0,201834300
588	0,0482564600	0,54704010	0,1470170000	0,041732230	0,202473300

589	0,0215162800	0,43515760	0,1463180000	0,021375370	0,201946000
590	0,0302855800	0,78892110	0,1457712000	0,024751170	0,201679900
591	0,1151598000	0,78374090	0,1454971000	0,062943530	0,200864800
592	0,3067425000	0,63084160	0,1452039000	0,201763700	0,200502500
593	0,4833297000	0,49848120	0,1446881000	0,433836900	0,200181000
594	0,5757804000	0,40303890	0,1436823000	0,647692700	0,198914300
595	0,5932249000	0,34054330	0,1431934000	0,793157000	0,198441900
596	0,5724432000	0,30146040	0,1426740000	0,871823100	0,197507100
597	0,5374892000	0,26017710	0,1416890000	0,900339200	0,196928500
598	0,4975446000	0,23168100	0,1408071000	0,895962000	0,195912600
599	0,4591060000	0,20516090	0,1402880000	0,878689800	0,194859400
600	0,4218976000	0,17599190	0,1392481000	0,849113800	0,193555200
601	0,3873024000	0,15741700	0,1383240000	0,814263700	0,192549900
602	0,3555794000	0,15263040	0,1375723000	0,775945600	0,191225600
603	0,3278120000	0,13505220	0,1363186000	0,734834800	0,189450900
604	0,3025191000	0,11974450	0,1354005000	0,699389200	0,187732900
605	0,2805128000	0,10788540	0,1340086000	0,661279000	0,186572000
606	0,2592759000	0,09816492	0,1325052000	0,625634900	0,185029600
607	0,2403298000	0,09070371	0,1316021000	0,591666600	0,183211900
608	0,2241836000	0,08404566	0,1303291000	0,560099500	0,181193700
609	0,2096147000	0,07974116	0,1291036000	0,531640200	0,179911400
610	0,1964051000	0,07875185	0,1276998000	0,503869500	0,177896500
611	0,1845030000	0,07046817	0,1264708000	0,480500000	0,176151500
612	0,1743473000	0,06658697	0,1248558000	0,455988800	0,173972500
613	0,1653804000	0,06201201	0,1234669000	0,436988100	0,172174100
614	0,1651717000	0,07000238	0,1219073000	0,428305600	0,169911400
615	0,3361560000	0,09123298	0,1204259000	0,676042500	0,168216800
616	0,3896388000	0,09800042	0,1190560000	0,740358900	0,165888500
617	0,2039912000	0,06417640	0,1173886000	0,465585000	0,163747800
618	0,1425809000	0,05529804	0,1160114000	0,372031400	0,161249800
619	0,1248847000	0,06700567	0,1145069000	0,341430900	0,159645600
620	0,1175183000	0,08893809	0,1127641000	0,327124800	0,157467900
621	0,1122653000	0,13841140	0,1111177000	0,314847600	0,154528600
622	0,1081335000	0,06750035	0,1094020000	0,303359000	0,152191000
623	0,1041160000	0,09579586	0,1082324000	0,293382000	0,150497500
624	0,1000799000	0,14605250	0,1063045000	0,283031000	0,147571700
625	0,0963547800	0,12298290	0,1045806000	0,274737400	0,145197900
626	0,0932357700	0,11979910	0,1028863000	0,267154400	0,142830600
627	0,0902347000	0,08254381	0,1012857000	0,259515300	0,140557800
628	0,0875715800	0,07347672	0,0991411100	0,252323100	0,137720500
629	0,0848876600	0,05531101	0,0978220800	0,245154800	0,135839600
630	0,0825751900	0,16727740	0,0964265300	0,238961800	0,133732800
631	0,0800770400	0,11868100	0,0945714900	0,233006400	0,131074600
632	0,0780417800	0,05685153	0,0927506500	0,226084800	0,128879000
633	0,0759372300	0,03854498	0,0910648200	0,221118200	0,126214800
634	0,0736694300	0,04105181	0,0894498500	0,217011800	0,124063600
635	0,0717849700	0,03575672	0,0877462400	0,212147000	0,121448300
636	0,0702841700	0,03210743	0,0862014900	0,207253800	0,119244600
637	0,0689265000	0,04389286	0,0844804300	0,202566100	0,116810300
638	0,0672192900	0,05576152	0,0826965900	0,198406300	0,114470800
639	0,0656149600	0,03565635	0,0811365800	0,193611700	0,112095600
640	0,0640923800	0,03057526	0,0794912400	0,190669300	0,109704100
641	0,0624909400	0,06553492	0,0777904900	0,186132500	0,107526100
642	0,0611483100	0,04324424	0,0761449400	0,182367100	0,105028300

643	0,0599018300	0,03065871	0,0745362100	0,178335200	0,102556600
644	0,0589427200	0,03076341	0,0731777500	0,175221400	0,100906600
645	0,0576527800	0,03279245	0,0715639400	0,172884500	0,098576400
646	0,0569340400	0,03073479	0,0700012400	0,171898200	0,096108850
647	0,0562079300	0,02728342	0,0683585800	0,169772800	0,094200960
648	0,0551311300	0,02629524	0,0670487400	0,166776900	0,091886450
649	0,0527784700	0,02699205	0,0654367900	0,159927800	0,089626940
650	0,0513147500	0,02478075	0,0639540900	0,154021900	0,087679540
651	0,0495479900	0,02263959	0,0624831700	0,148675100	0,085669090
652	0,0488699600	0,02614273	0,0611035200	0,147043700	0,083632030
653	0,0487142800	0,02699675	0,0596864600	0,147055900	0,081504560
654	0,0491409600	0,02397338	0,0583048000	0,150077600	0,079669080
655	0,0492919400	0,02437323	0,0571525700	0,151836100	0,077844620
656	0,0491844900	0,02545150	0,0556837900	0,152160200	0,075850320
657	0,0484046500	0,02438441	0,0543443600	0,151084400	0,074045180
658	0,0470888800	0,02506645	0,0529437900	0,146791500	0,072082210
659	0,0458255300	0,02615414	0,0516523600	0,141600600	0,070180770
660	0,0440575400	0,02560536	0,0505034300	0,136298000	0,068546030
661	0,0427025900	0,02211630	0,0494007700	0,130871400	0,066860390
662	0,0417162500	0,02018039	0,0480706100	0,126709100	0,065055680
663	0,0408603300	0,01916301	0,0468073500	0,125329000	0,063654610
664	0,0409608000	0,01963543	0,0456758100	0,125268500	0,061789500
665	0,0411019700	0,01992733	0,0446143000	0,127501100	0,060340580
666	0,0422089600	0,02183177	0,0434805400	0,130950800	0,058664060
667	0,0429041800	0,02161964	0,0424511600	0,135255000	0,057277570
668	0,0436746400	0,02198628	0,0413981600	0,139599900	0,055649550
669	0,0444324800	0,02336903	0,0403985000	0,143537000	0,054274090
670	0,0451923800	0,09411919	0,0394307300	0,145731300	0,052861160
671	0,0454911600	0,12021110	0,0383186200	0,147887100	0,051433530
672	0,0453828800	0,05454258	0,0372205400	0,146882200	0,050010770
673	0,0444596700	0,03766672	0,0364282200	0,145222900	0,048711670
674	0,0435865700	0,03834534	0,0355525200	0,142365400	0,047416840
675	0,0424638700	0,02806431	0,0345069500	0,137315000	0,046060200
676	0,0406632900	0,02310528	0,0336955800	0,131809300	0,044713260
677	0,0393529000	0,02192461	0,0327711700	0,125923100	0,043682330
678	0,0374121500	0,02125770	0,0319867600	0,119220700	0,042442920
679	0,0357385100	0,02183040	0,0309810700	0,112979100	0,041183620
680	0,0342652700	0,02109031	0,0303450500	0,105803500	0,040264190
681	0,0324100000	0,02590449	0,0294753200	0,099801420	0,039052650
682	0,0306974100	0,03242358	0,0286379200	0,093630420	0,037969040
683	0,0294567200	0,03639900	0,0279431300	0,088602680	0,036698080
684	0,0282447200	0,02443850	0,0273144800	0,083713620	0,035819770
685	0,0271458400	0,01732336	0,0266090700	0,079517290	0,034974960
686	0,0260821900	0,01460484	0,0257700200	0,075837140	0,033792880
687	0,0251958100	0,01579398	0,0250631200	0,072338510	0,032877620
688	0,0246347700	0,01843634	0,0244580200	0,069966240	0,032012860
689	0,0238969400	0,01598461	0,0237540700	0,067325640	0,031105810
690	0,0233307800	0,01518894	0,0230671200	0,066221620	0,030244660
691	0,0231565100	0,01862841	0,0224519500	0,063920940	0,029415560
692	0,0225549200	0,01549465	0,0219479100	0,062979270	0,028687730
693	0,0223634800	0,01344415	0,0212835600	0,061419730	0,027951490
694	0,0221291400	0,01412182	0,0208099000	0,060828390	0,027261120
695	0,0219552700	0,01448443	0,0203256600	0,060090670	0,026382320
696	0,0216396500	0,01405746	0,0196764700	0,059164970	0,025607010

697	0,0215077900	0,01294138	0,0190377300	0,058263480	0,024671220
698	0,0210862700	0,01338056	0,0185746200	0,057616310	0,024036870
699	0,0212791300	0,01549012	0,0180211600	0,057795830	0,023237420
700	0,0208629600	0,01490152	0,0175354100	0,057038160	0,022669000
701	0,0205132100	0,01526910	0,0170415800	0,056764720	0,022051230
702	0,0204131200	0,01316925	0,0165816600	0,056088310	0,021324400
703	0,0201193800	0,01141133	0,0161072600	0,056075240	0,020732980
704	0,0199699200	0,01034755	0,0155921700	0,055174020	0,020104340
705	0,0200636100	0,01039245	0,0151938900	0,054525220	0,019628300
706	0,0200491100	0,01060719	0,0148640700	0,054217520	0,018997310
707	0,0197921400	0,01062144	0,0142955100	0,054031720	0,018415600
708	0,0194823300	0,01180412	0,0140515800	0,053801320	0,017841740
709	0,0193750400	0,01137442	0,0136061600	0,053055990	0,017306630
710	0,0191998900	0,01035114	0,0132472300	0,053038350	0,016857150
711	0,0192089000	0,00948774	0,0128174500	0,052368500	0,016478840
712	0,0189538500	0,00960842	0,0125373500	0,052490900	0,015824470
713	0,0190282700	0,01010417	0,0122150700	0,051929830	0,015386880
714	0,0189820700	0,01086358	0,0118282100	0,051272510	0,015019880
715	0,0186919200	0,01008449	0,0115011800	0,051082540	0,014514800
716	0,0186621000	0,00984334	0,0111595200	0,050937220	0,014143180
717	0,0185800500	0,01285806	0,0108000600	0,050987300	0,013732770
718	0,0185301800	0,01027345	0,0105144900	0,049755100	0,013323090
719	0,0181933300	0,00953001	0,0103087200	0,049795180	0,012890970
720	0,0182136200	0,00943638	0,0099126050	0,049783890	0,012627730
721	0,0182397100	0,00998203	0,0096594760	0,048988280	0,012093570
722	0,0180379100	0,00971638	0,0093718060	0,049022350	0,011721210
723	0,0180538300	0,00915982	0,0089599060	0,048487530	0,011449600
724	0,0179280400	0,00904410	0,0088968930	0,048876770	0,011083540
725	0,0178829500	0,00908634	0,0085775860	0,048293160	0,010728660
726	0,0176833700	0,01001344	0,0083871850	0,048091800	0,010472390
727	0,0178594300	0,00943581	0,0080842830	0,047950440	0,010074400
728	0,0176883000	0,00959702	0,0079553970	0,047441870	0,009885295
729	0,0176112600	0,00921946	0,0076325480	0,047633900	0,009545669
730	0,0173979900	0,00981989	0,0074644380	0,047580060	0,009245803
731	0,0177295000	0,00944646	0,0072688830	0,047383220	0,008993519
732	0,0175299800	0,00962143	0,0069973900	0,047045600	0,008660845
733	0,0173939500	0,00937685	0,0067835520	0,046618800	0,008480703
734	0,0171265900	0,00902908	0,0067255320	0,046904660	0,008229223
735	0,0174505400	0,00852471	0,0064240020	0,046424770	0,008021495
736	0,0175062000	0,00832309	0,0062822680	0,046654760	0,007731443
737	0,0175917600	0,00842066	0,0061654300	0,046995000	0,007562687
738	0,0177152200	0,00884256	0,0059513890	0,047092000	0,007350400
739	0,0176913800	0,00881690	0,0057572420	0,046724300	0,007057354
740	0,0176054200	0,00878878	0,0054888700	0,046615550	0,006835097
741	0,0174290100	0,00842857	0,0054563230	0,045985200	0,006642811
742	0,0172637300	0,00875211	0,0052460030	0,046164520	0,006523320
743	0,0175847800	0,00895229	0,0050842450	0,045908640	0,006296910
744	0,0174011900	0,00866808	0,0050419080	0,045624770	0,006005074
745	0,0175780300	0,00883210	0,0049043230	0,045696820	0,005801328
746	0,0174221800	0,00864600	0,0046606750	0,046060170	0,005632394
747	0,0177064100	0,00887410	0,0045395980	0,045826300	0,005486810
748	0,0176826100	0,00903205	0,0043386810	0,046584190	0,005390413
749	0,0178607800	0,00892217	0,0042861100	0,046240760	0,005269379
750	0,0186888200	0,00935918	0,0041546920	0,046813330	0,005079912

751	0,0205210700	0,00979962	0,0040579410	0,049384930	0,004934340
752	0,0205713700	0,01244363	0,0039100860	0,049508930	0,004756732
753	0,0195888100	0,01130710	0,0038331310	0,048375770	0,004709639
754	0,0188098200	0,01056636	0,0037353900	0,047769570	0,004458102
755	0,0185132600	0,01187853	0,0036144460	0,047042260	0,004337450
756	0,0176164600	0,01123171	0,0034732620	0,046171900	0,004176366
757	0,0173738700	0,01222756	0,0034103110	0,045942460	0,004130513
758	0,0174850400	0,01207484	0,0032805660	0,045533750	0,003950807
759	0,0173930200	0,01072544	0,0031145850	0,045196960	0,003771774
760	0,0173680700	0,01030399	0,0030905700	0,045540400	0,003754647
761	0,0174253500	0,01031199	0,0030329000	0,045049670	0,003700378
762	0,0171635300	0,01046569	0,0029522790	0,044641440	0,003572736
763	0,0171616100	0,00956715	0,0028844510	0,045020770	0,003467458
764	0,0171953800	0,00988004	0,0027667100	0,044363490	0,003337051
765	0,0178373300	0,01031530	0,0027156330	0,046097370	0,003222471
766	0,0403086600	0,02829392	0,0026594610	0,097201710	0,003110283
767	0,0329650300	0,02232659	0,0025748010	0,080814730	0,003084687
768	0,0266342200	0,01707591	0,0024723260	0,065891010	0,003062156
769	0,0324529600	0,02278204	0,0023838710	0,080009710	0,002891813
770	0,0380792700	0,02631067	0,0023344090	0,091931880	0,002743900
771	0,0267135100	0,01750429	0,0022417720	0,066863600	0,002662602
772	0,0225399600	0,01520547	0,0023111480	0,056991520	0,002605771
773	0,0212625300	0,01740427	0,0021543830	0,053734810	0,002461368
774	0,0189842700	0,02072360	0,0021287620	0,048623960	0,002438418
775	0,0172680300	0,01561756	0,0020372610	0,044248570	0,002413009
776	0,0168073600	0,01335275	0,0020028000	0,043169430	0,002312808
777	0,0171062300	0,01265921	0,0018161500	0,043525710	0,002207859
778	0,0170236500	0,01281540	0,0017886610	0,043615580	0,002205972
779	0,0175068900	0,01335213	0,0018363530	0,044128810	0,002068884
780	0,0179924000	0,01518881	0,0017485820	0,045196060	0,001969272

ANNEXE 8. COMPARAISON DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION À LA LUMIÈRE BLEUE ÉMISE PAR LES LUMINAIRES DE RUE (8 LUX) ET PRÉSENTE À L'INTÉRIEUR DE LA MAISON (67 LUX)

La Figure 30 présente la distribution énergétique spectrale de deux luminaires de rue comparables pouvant être utilisés sur une grande artère : un luminaire HPS 250 W à 2 100°K (rouge) et un luminaire DEL 108 W à 4 000°K (bleu) (Ville de Montréal, 2016). Le flux énergétique du luminaire DEL 108 W à 4 000°K est plus élevé dans les longueurs d'onde de la lumière bleue que celui du luminaire HPS 250 W correspondant.

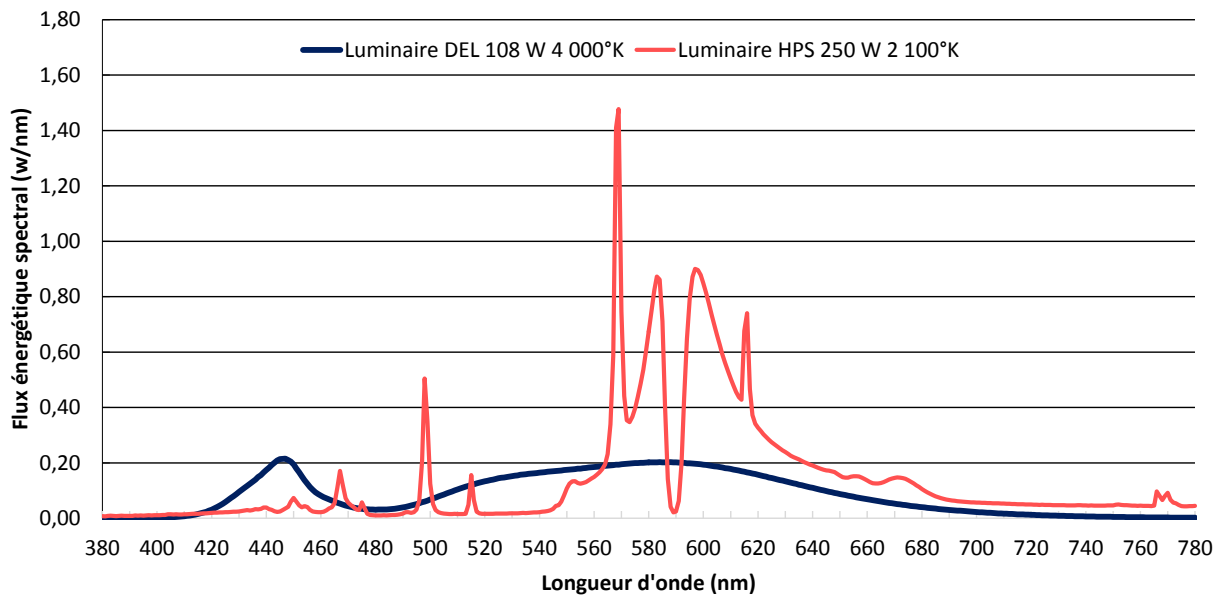


Figure 30. Comparaison du flux énergétique spectral d'un luminaire HPS 250 W à 2 100°K (courbe rouge) et d'un luminaire DEL 108 W à 4 000°K (courbe bleue)

Source : Ville de Montréal, 2016

Le Tableau 14 présente les résultats des estimations de l'exposition à l'œil à la lumière bleue pour une personne qui marche sur le trottoir d'une grande artère (8 lux) et une autre qui lit un livre papier dans sa maison (67 lux). Les conclusions de l'évaluation des risques à la santé de ces deux scénarios sont les mêmes que celles présentées à la section 6.3.

Tableau 15. Comparaison de l'exposition à la lumière bleue émise lors d'une marche sur le trottoir d'une artère (8 lux) et lors de la lecture d'un livre papier éclairé par différents types de lampes intérieures (67 lux) – luminaire de rue 108 W à 4 000°K

SCÉNARIOS D'EXPOSITION		CARACTÉRISTIQUES DES LUMINAIRES ET DES LAMPES			EXPOSITION À L'ŒIL À LA QUANTITÉ DE LUMIÈRE BLEUE					
Activité (éclairage à l'œil)	Type de luminaires de rue ou de lampes intérieures				En fonction des longueurs d'onde de 405 à 530 nm ¹		En fonction des longueurs d'onde de 380 à 580 nm ²		En fonction de la courbe de sensibilité à la mélatonine ³	
		Puissance totale (W)	Température de couleur (°K)	Pourcentage de bleu (405-530 nm)	Puissance de lumière bleue (W)	Variation ⁴ par rapport au luminaire de rue DEL à 4 000°K (sans unité)	Puissance de lumière bleue (W)	Variation ⁴ par rapport au luminaire de rue DEL à 4 000°K (sans unité)	Puissance de lumière bleue pondérée (W*)	Variation ⁴ par rapport au luminaire de rue DEL à 4 000°K (sans unité)
Marcher sur le trottoir éclairé par un luminaire de rue (8 lux) ⁵	HPS	250	2 100	9%	0,002	0,3	0,007	0,5	0,002	0,3
	DEL	108	4 000	32%	0,007	1,0	0,014	1,0	0,006	1,0
Lire un livre éclairé par une lampe intérieure (67 lux) ⁶	Incandescent	100	2 450	11%	0,036	4,8	0,081	5,8	0,026	4,5
	Fluorocompacte	20	2 700	11%	0,021	2,8	0,075	5,3	0,021	3,6
	Halogène	65	3 000	13%	0,039	5,2	0,086	6,1	0,029	4,8
	DEL	9	3 000	25%	0,052	7,0	0,102	7,2	0,044	7,4

W* : Puissance en watt de lumière bleue comprise entre 380 et 580 nm et pondérée selon la courbe de sensibilité à la mélatonine dans DIN V 5031-100:2009-06, 2009.

¹ Étendue de longueurs d'onde retenue par la norme du BNQ, 2016

² Étendue de longueurs d'onde retenue par DIN V 5031-100:2009-06, 2009

³ Calculé selon le spectre d'action proposé dans DIN V 5031-100:2009-06, 2009

⁴ La variation a été calculée selon l'équation : Puissance du luminaire ou de la lampe (W) / Puissance du luminaire DEL à 4 000°K (W)

⁵ Valeur moyenne d'exposition à l'œil (éclairage vertical) d'une personne circulant sur le trottoir d'une artère de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2016)

⁶ Valeur moyenne d'exposition à l'œil des sujets de l'étude de Rangtell et coll., 2016

LISTE DES RÉFÉRENCES

- 1000Bulbs Lighting Blog, 2016. What is a BUG rating? <http://blog.1000bulbs.com/home/what-is-a-bug-rating>.
- ADEME, 2014. L'éclairage à diodes électroluminescentes (LED). Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.
- Akinyemiju, T. F., Genkinger, J. M., Farhat, M., Wilson, A., Gary-Webb, T. L., et Tehranifar, P., 2015. Residential environment and breast cancer incidence and mortality: a systematic review and meta-analysis. *BMC Cancer*, 15: 191-.
- Alberti, K. G. M. M., Eckel, R. H., Grundy, S. M., Zimmet, P. Z., Cleeman, J. I., Donato, K. A., Fruchart, J. C., James, W. P., Loria, C. M., et Smith, S. C., 2009. Harmonizing the Metabolic Syndrome. *Circulation*, 120: 1640-.
- AMA, 2016. Human and environmental effects of light emitting diode (LED) community lighting *dans* Report of the concil on science and public health.
- Anisimov, V. N., Baturin, D. A., Popovich, I. G., Zabezhinski, M. A., Manton, K. G., Semenchenko, A. V., et Yashin, A. I., 2004. Effect of exposure to light-at-night on life span and spontaneous carcinogenesis in female CBA mice. *Int. J. Cancer*, 111: 475-479.
- ANSES, 2010. Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED). Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail France. 282 pages, <https://www.anses.fr/fr/content/syst%C3%A8mes-d%C3%A9clairage-utilisant-des-diodes-%C3%A9lectroluminescentes-led-des-effets-sanitaires-%C3%A0>.
- Aoki, H., Yamada, N., Ozeki, Y., Yamane, H., et Kato, N., 1998. Minimum light intensity required to suppress nocturnal melatonin concentration in human saliva. *Neuroscience Letters*, 252: 91-94.
- Arendt, J., 1998. Melatonin and the pineal gland: influence on mammalian seasonal and circadian physiology. *Rev Reprod*, 3: 13-22.
- Arrondissement de Verdun, 2015. Documents fournis par l'arrondissement Verdun concernant les luminaires piétons DEL installés sur les pistes cyclables de l'Île-des-Soeurs.
- Ashdown, I., 2015. Light Pollution and Uplight Ratings. <http://agi32.com/blog/category/tm-15-11-bug-ratings/>.
- Bauer, S. E., Wagner, S. E., Burch, J., Bayakly, R., et Vena, J. E., 2013. A case-referent study: light at night and breast cancer risk in Georgia. *International Journal of Health Geographics*, 12: 23-.
- Beaulieu, C., 2009. Effet de l'histoire lumineuse sur la sensibilité rétinienne et circadienne à la lumière (Thèse de doctorat inédite). Université de Montréal.
- Behar-Cohen, F., Martinsons, C., et coll., 2011. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye? *Progress in Retinal and Eye Research*, 30: 239-257.

- Ben Shlomo, R., 2014. Chronodisruption, cell cycle checkpoints and DNA repair. *Indian J. Exp. Biol.*, 52: 399-403.
- Ben Shlomo, R. et Kyriacou, C. P., 2010. Light pulses administered during the circadian dark phase alter expression of cell cycle associated transcripts in mouse brain. *Cancer Genet. Cytogenet.*, 197: 65-70.
- Benloucif, S., Green, K., L'Hermite-Balériaux, M., Weintraub, S., Wolfe, L. F., et Zee, P. C., 2006. Responsiveness of the aging circadian clock to light. *Neurobiol Aging*, 27: 1870-1879.
- Berson, D. M., Dunn, F. A., et Takao, M., 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 295: 1070-1073.
- Blask, D. E., 2009. Melatonin, sleep disturbance and cancer risk. *Sleep Med. Rev.*, 13: 257-264.
- Blask, D. E., Brainard, G. C., Dauchy, R. T., Hanifin, J. P., Davidson, L. K., Krause, J. A., Sauer, L. A., Rivera-Bermudez, M. A., Dubocovich, M. L., Jasser, S. A., Lynch, D. T., Rollag, M. D., et Zalatan, F., 2005. Melatonin-depleted blood from premenopausal women exposed to light at night stimulates growth of human breast cancer xenografts in nude rats. *Cancer Res.*, 65: 11174-11184.
- Blask, D. E., Dauchy, R. T., Dauchy, E. M., Mao, L., Hill, S. M., Greene, M. W., Belancio, V. P., Sauer, L. A., et Davidson, L., 2014. Light exposure at night disrupts host/cancer circadian regulatory dynamics: impact on the Warburg effect, lipid signaling and tumor growth prevention. *PLoS. One.*, 9: e102776-.
- BNQ, 2016. Éclairage extérieur - Contrôle de la pollution lumineuse - BNQ 4930-100/2016. Bureau de normalisation du Québec. 59 pages, <http://www.bnq.qc.ca/fr/normalisation/environnement/contrôle-de-la-pollution-lumineuse.html>.
- Boivin, D. B. et James, F. O., 2002. Phase-Dependent Effect of Room Light Exposure in a 5-h Advance of the Sleep-Wake Cycle: Implications for Jet Lag. *J Biol Rhythms*, 17: 266-276.
- Brainard, G. C. et Hanifin, J. P., 2005. Photons, clocks, and consciousness. *J. Biol. Rhythms*, 20: 314-325.
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., et Rollag, M. D., 2001. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*, 21: 6405-6412.
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Warfield, B., Stone, M. K., James, M. E., Ayers, M., Kubey, A., Byrne, B., et Rollag, M., 2015. Short-wavelength enrichment of polychromatic light enhances human melatonin suppression potency. *J. Pineal Res.*, 58: 352-361.
- Brainard, G. C., Sliney, D., Hanifin, J. P., Glickman, G., Byrne, B., Greeson, J. M., Jasser, S., Gerner, E., et Rollag, M. D., 2008. Sensitivity of the Human Circadian System to Short-Wavelength (420-nm) Light. *J Biol Rhythms*, 23: 379-386.
- Bullough, J. D., Rea, M. S., et Figueiro, M. G., 2006. Of mice and women: light as a circadian stimulus in breast cancer research. *Cancer Causes Control*, 17: 375-383.
- Carsat Nord-Est, 2013. Conception des lieux et situations de travail (CLST). Éclairage des locaux de travail: focus sur les led. Département des Risques Professionnels. 4 pages.

- Casper, R. F. et Rahman, S.. Spectral modulation of light wavelengths using optical filters: effect on melatonin secretion. *Fertility and Sterility*, 102: 336-338.
- Centre de recherche de l'Hôpital Douglas, 2013. Le cerveau à tous les niveaux.
http://lecerveau.mcgill.ca/flash/i/i_11/i_11_p/i_11_p_hor/i_11_p_hor.html.
- Challet, E., 2015. Keeping circadian time with hormones. *Diabetes Obes Metab*, 17: 76-83.
- Chang, A. M., Santhi, N., St Hilaire, M., Gronfier, C., Bradstreet, D. S., Duffy, J. F., Lockley, S. W., Kronauer, R. E., et Czeisler, C. A., 2012. Human responses to bright light of different durations. *J Physiol*, 590: 3103-3112.
- Chlebowski, R. T., Hendrix, S. L., Langer, R. D., Stefanick, M. L., Gass, M., Lane, D., Rodabough, R. J., Gilligan, M. A., Cyr, M. G., Thomson, C. A., Khandekar, J., Petrovitch, H., et McTiernan, A., 2003. Influence of estrogen plus progestin on breast cancer and mammography in healthy postmenopausal women: the Women's Health Initiative Randomized Trial. *JAMA*, 289: 3243-3253.
- CNRS, 2016. Le spectre de la lumière. Site consulté le 12 décembre 2016,
http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doschim/decouv/couleurs/loupe_spect_lum.html.
- Collaborative Group on Hormonal Factors in Breast Cancer, 2002. Breast cancer and breastfeeding: collaborative reanalysis of individual data from 47 epidemiological studies in 30 countries, including 50302 women with breast cancer and 96973 women without the disease. *Lancet*, 360: 187-195.
- Czeisler, C. A., Allan, J. S., Strogatz, S. H., Ronda, J. M., Sanchez, R., Rios, C. D., Freitag, W. O., Richardson, G. S., et Kronauer, R. E., 1986. Bright light resets the human circadian pacemaker independent of the timing of the sleep-wake cycle. *Science*, 233: 667-.
- Czeisler, C. A., Duffy, J. F., Shanahan, T. L., Brown, E. N., Mitchell, J. F., Rimmer, D. W., Ronda, J. M., Silva, E. J., Allan, J. S., Emens, J. S., Dijk, D. J., et Kronauer, R. E., 1999. Stability, Precision, and Near-24-Hour Period of the Human Circadian Pacemaker. *Science*, 284: 2177-.
- Davis, S., Mirick, D. K., et Stevens, R. G., 2001. Night Shift Work, Light at Night, and Risk of Breast Cancer. *Journal of the National Cancer Institute*, 93: 1557-1562.
- Dewan, K., Benloucif, S., Reid, K., Wolfe, L. F., et Zee, P. C., 2011. Light-Induced Changes of the Circadian Clock of Humans: Increasing Duration is More Effective than Increasing Light Intensity. *Sleep*, 34: 593-599.
- DiLaura, D. L. et coll., 2011. The lighting handbook. Tenth Edition: Reference and application. Illuminating Engineering Society of North America.
- DIN V 5031-100:2009-06, 2009. Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra.
<http://infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=1132336>.
- DRSP, 2016. Mesures d'éclairage effectués sur la chaussée et quelques trottoirs de Montréal ainsi qu'à l'intérieur de quelques résidences. Direction régionale de santé publique du Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal.

- Duffy, J. F., Zeitzer, J. M., et Czeisler, C. A., 2007. Decreased sensitivity to phase-delaying effects of moderate intensity light in older subjects. *Neurobiol Aging*, 28: 799-807.
- Duval, B., 2012. Les fondamentaux de l'éclairagisme s'appliquent-ils de la même façon aux produits LED? Association française de l'éclairage. 10 pages, <http://www.afe-eclairage.fr/docs/10378-ext.pdf>.
- Ellisen, L. W. et Haber, D. A., 1998. Hereditary breast cancer. *Annu. Rev. Med.*, 49: 425-436.
- Esquirol, Y., Bongard, V., Mabile, L., Jonnier, B., Soulat, J., et Perret, B., 2009. Shift Work and Metabolic Syndrome: Respective Impacts of Job Strain, Physical Activity, and Dietary Rhythms. *Chronobiology International*, 26: 544-559.
- Figueiro, M. G., Bullough, J. D., Parsons, R. H., et Rea, M. S., 2-9-2004. Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans. *Neuroreport*, 15: 313-316.
- Figueiro, M. G., Rea, M. S., et Bullough, J. D., 2006. Does architectural lighting contribute to breast cancer? *Journal of carcinogenesis*, 5.
- Fonken, L. K. et Nelson, R. J., 2014. The Effects of Light at Night on Circadian Clocks and Metabolism. *Endocrine Reviews*, 35: 648-670.
- Foster, R. G. et Hankins, M. W., 2007. Circadian vision. *Curr. Biol.*, 17: R746-R751.
- Gauger, M. A. et Sancar, A., 2005. Cryptochrome, circadian cycle, cell cycle checkpoints, and cancer. *Cancer Res.*, 65: 6828-6834.
- Golden, R. N., Gaynes, B. N., Ekstrom, R. D., Hamer, R. M., Jacobsen, F. M., Suppes, T., Wisner, K. L., et Nemeroff, C. B., 2005. The Efficacy of Light Therapy in the Treatment of Mood Disorders: A Review and Meta-Analysis of the Evidence. *AJP*, 162: 656-662.
- Gooley, J. J., Rajaratnam, S. M., Brainard, G. C., Kronauer, R. E., Czeisler, C. A., et Lockley, S. W., 2010. Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light. *Sci Transl Med*, 2: 31ra33-31ra33.
- Gronli, J. et coll., 2016. Reading from an iPad or from a book in bed: the impact on human sleep. A randomized controlled crossover trial. *Sleep Medecine*, 21: 86-92.
- Haim, A. et Zubidat, A., 5-5-2015. Artificial light at night: melatonin as a mediator between the environment and epigenome. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 370: 20140121-.
- Hamajima, N., Hirose, K., et Tajima, K., 2002. Alcohol, tobacco and breast cancer--collaborative reanalysis of individual data from 53 epidemiological studies, including 58,515 women with breast cancer and 95,067 women without the disease. *Br. J. Cancer*, 87: 1234-1245.
- Hastings, M. H., Maywood, E. S., et O'Neill, J. S., 2008. Cellular circadian pacemaking and the role of cytosolic rhythms. *Curr. Biol.*, 18: R805-R815.
- He, C., Anand, S. T., Ebell, M. H., Vena, J. E., et Robb, S. W., 2015. Circadian disrupting exposures and breast cancer risk: a meta-analysis. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 88: 533-547.
- Hébert, M., Martin, S. K., Lee, C., et Eastman, C. I., 2002. The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *J. Pineal Res.*, 33: 198-203.

- Higuchi, S., Nagafuchi, Y., Lee, S. i., et Harada, T., 2014. Influence of Light at Night on Melatonin Suppression in Children. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 99: 3298-3303.
- Hurley, S., Goldberg, D., Nelson, D., Hertz, A., Horn-Ross, P. L., Bernstein, L., et Reynolds, P., 2014. Light at Night and Breast Cancer Risk Among California Teachers. *Epidemiology*, 25: 697-706.
- IARC, 2010. Painting, Firefighting, and Shiftwork. Volume 98. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans.
- IARC, 11-26-2014. Half million new cancers in 2012 due to overweight and obesity. Proportion of obesity-related cancers higher in women.
- ICNIRP, 2013. ICNIRP Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. 96 pages.
- IDA et IES, 2009. The BUG System - A new way to control stray light from outdoor luminaires. *International Dark-Sky Association*, 2: 6.
- IES, 2011. Fundamentals of lighting - Addenda #1 Bug ratings - Backlight, Uplight and Glare (ref. TM-15 and addenda). Illuminating Engineering Society of North America, <https://www.ies.org/pdf/education/ies-fol-addenda-1-%20bug-ratings.pdf>.
- IES, 2014. Roadway Lighting ANSI/IES RP-8-14. Illuminating Engineering Society. 43 pages, http://www.techstreet.com/ies/standards/ies-rp-8-14?gateway_code=ies&product_id=1883732.
- Ijaz, S., Verbeek, J., Seidler, A., Lindbohm, M. L., Ojajärvi, A., Orsini, N., Costa, G., et Neuvonen, K., 2013. Night-shift work and breast cancer. A systematic review and meta-analysis. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 431-447.
- Jaadane, I. et al, 2015. Retinal damage induced by commercial light emitting diodes (LEDs). *Free Radical Biology and Medicine*, 84: 373-384.
- Jasser, S. A., Hanifin, J. P., Rollag, M. D., et Brainard, G. C., 2006. Dim light adaptation attenuates acute melatonin suppression in humans. *J. Biol. Rhythms*, 21: 394-404.
- Jia, Y., Lu, Y., Wu, K., Lin, Q., Shen, W., Zhu, M., Huang, S., et Chen, J., 2013. Does night work increase the risk of breast cancer? A systematic review and meta-analysis of epidemiological studies. *Cancer Epidemiology*, 37: 197-206.
- Kamdar, B. B., Tergas, A. I., Mateen, F. J., Bhayani, N. H., et Oh, J., 2013. Night-shift work and risk of breast cancer: a systematic review and meta-analysis. *Breast Cancer Research and Treatment*, 138: 291-301.
- Karlsson, B., Knutsson, A., et Lindahl, B., 2001. Is there an association between shift work and having a metabolic syndrome? Results from a population based study of 27-å485 people. *Occup Environ Med*, 58: 747-752.
- Keshet-Sitton, A., Or-Chen, K., Yitzhak, S., Tzabary, I., et Haim, A., 2016a. Can Avoiding Light at Night Reduce the Risk of Breast Cancer? *Integrative Cancer Therapies*, 15: 145-152.
- Keshet-Sitton, A., Or-Chen, K., Yitzhak, S., Tzabary, I., et Haim, A., 2016b. Light and the City: Breast Cancer Risk Factors Differ Between Urban and Rural Women in Israel. *Integrative Cancer Therapies*.

- Kim, S. J., Benloucif, S., Reid, K. J., Weintraub, S., Kennedy, N., Wolfe, L. F., et Zee, P. C., 2014. Phase-shifting response to light in older adults. *J Physiol*, 592: 189-202.
- Kim, Y. J., Lee, E., Lee, H. S., Kim, M., et Park, M. S., 2015. High prevalence of breast cancer in light polluted areas in urban and rural regions of South Korea: An ecologic study on the treatment prevalence of female cancers based on National Health Insurance data. *Chronobiology International*, 32: 657-667.
- Kim, Y. J., Lee, E., Lee, H. S., Kim, M., et Park, M. S., 2016. High Incidence of Breast Cancer in Light-Polluted Areas with Spatial Effects in Korea. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 17: 361-367.
- Kinsey, B., 2016. The Light Post: Official MSSLC e-Newsletter. municipal solid-State Street Lighting Consortium et U.S.Department of Energy.
- Kinze, B., 2016. Counting the Blues of Street Lighting. IES Street and Area Lighting - Conference 2016.
- Kloog, I., Haim, A., Stevens, R. G., et Portnov, B. A., 2009. Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. *Chronobiol. Int.*, 26: 108-125.
- Kloog, I., Haim, A., Stevens, R. G., Barchana, M., et Portnov, B. A., 2008. Light at Night Co-Distributes with Incident Breast but not Lung Cancer in the Female Population of Israel. *Chronobiology International*, 25: 65-81.
- Kloog, I., Portnov, B. A., Rennert, H. S., et Haim, A., 2011. Does the Modern Urbanized Sleeping Habitat Pose a Breast Cancer Risk? *Chronobiology International*, 28: 76-80.
- Kloog, I., Stevens, R. G., Haim, A., et Portnov, B. A., 2010. Nighttime light level co-distributes with breast cancer incidence worldwide. *Cancer Causes & Control*, 21: 2059-2068.
- Koo, Y. S., Song, J. Y., Joo, E. Y., Lee, H. J., Lee, E., Lee, S. k., et Jung, K. Y., 2016. Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: Cross-sectional analysis in the KoGES study. *Chronobiology International*, 33: 301-314.
- Kozaki, T., Kubokawa, A., Taketomi, R., et Hatae, K., 2015. Effects of day-time exposure to different light intensities on light-induced melatonin suppression at night. *J Physiol Anthropol*, 34: 27-.
- Kozaki, T., Kubokawa, A., Taketomi, R., et Hatae, K., 2016. Light-induced melatonin suppression at night after exposure to different wavelength composition of morning light. *Neuroscience Letters*, 616: 1-4.
- Kripke, D. F., Elliott, J. A., Youngstedt, S. D., et Rex, K. M., 2007. Circadian phase response curves to light in older and young women and men. *J Circadian Rhythms*, 5: 4-4.
- Kubo, T., Ozasa, K., Mikami, K., Wakai, K., Fujino, Y., Watanabe, Y., Miki, T., Nakao, M., Hayashi, K., Suzuki, K., Mori, M., Washio, M., Sakauchi, F., Ito, Y., Yoshimura, T., et Tamakoshi, A., 2006. Prospective cohort study of the risk of prostate cancer among rotating-shift workers: findings from the Japan collaborative cohort study. *Am. J. Epidemiol.*, 164: 549-555.
- Laperrière, A., 2011. Éclairage de rues à DEL à la municipalité de Saint-Gédéon-de-Beauce dans le cadre des technologies avancées d'éclairage. 120 pages.
- Laperrière, A., 2014. Exterior lighting with low blue content. Rapport technique. IREQ-2014-0077. Hydro-Québec - Institut de recherche.

- Legris, C., 2006. Guide technique et réglementaire sur l'éclairage extérieur - Révision 2006. Projet de lutte contre la pollution lumineuse. Astrolab du Mont-Mégantic. 31 + annexes pages.
- Lewy, A. J., Wehr, T. A., Goodwin, F. K., Newsome, D. A., et Markey, S. P., 1980. Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science*, 210: 1267-.
- Li, Q., Zheng, T., Holford, T. R., Boyle, P., Zhang, Y., et Dai, M., 2010. Light at night and breast cancer risk : results from a population-based case-control study in Connecticut, USA. *Cancer Causes Control*, 21: 2281-2285.
- Lin, Y. C., Hsiao, T. J., et Chen, P. C., 2009a. Shift work aggravates metabolic syndrome development among early-middle-aged males with elevated ALT. *World J Gastroenterol*, 15: 5654-5661.
- Lin, Y. C., Hsiao, T. J., et Chen, P. C., 2009b. Persistent Rotating Shift-Work Exposure Accelerates Development of Metabolic Syndrome among Middle-Aged Female Employees: A Five-Year Follow-Up. *Chronobiology International*, 26: 740-755.
- Liu, Y., Tobias, D. K., Sturgeon, K. M., Rosner, B., Malik, V., Cespedes, E., Joshi, A. D., Eliassen, A. H., et Colditz, G. A., 2016. Physical activity from menarche to first pregnancy and risk of breast cancer. *Int. J. Cancer*, 139: 1223-1230.
- Lockley, S. W. et Lipson, S., 2014. Cambridge Streetlight Conversion Factsheet. Cambridge electrical department. 3 pages.
- Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper, H. M., Czeisler, C. A., Figueiro, M. G., Gamlin, P. D., Lockley, S. W., O'Hagan, J. B., Price, L. L., Provencio, I., Skene, D. J., et Brainard, G. C., 2014. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci.*, 37: 1-9.
- Macacu, A., Autier, P., Boniol, M., et Boyle, P., 2015. Active and passive smoking and risk of breast cancer: a meta-analysis. *Breast Cancer Res. Treat.*, 154: 213-224.
- Martinsons, C. et Zissis, G., 2014. Solid State Lighting Annex - Potential health issues of Solid State Lighting Final report. International Energy Agency 4E Solid State Lighting Annex Task 1. 58 pages.
- McFadden, E., Jones, M. E., Schoemaker, M. J., Ashworth, A., et Swerdlow, A. J., 2014. The Relationship Between Obesity and Exposure to Light at Night: Cross-Sectional Analyses of Over 100,000 Women in the Breakthrough Generations Study. *American Journal of Epidemiology*.
- McIntyre, I. M., Norman, T. R., Burrows, G. D., et Armstrong, S. M., 1989. Human Melatonin Suppression by Light is Intensity Dependent. *J. Pineal Res.*, 6: 149-156.
- Nicoloro, L. et coll., 2013. Light pollution - presentation.
<https://www.google.ca/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwiitoKiju3QAhXBQSYKHcMODYoQjRwIBw&url=https%3A%2F%2Fworldoptimalization.files.wordpress.com%2F2015%2F01%2FFlight-pollution-presentation.pptx&bvm=bv.141320020,d.cGc&psig=AFQjCNHx377lbHQN8KekSCJWw5S14UFcjQ&ust=1481579066508584>.
- O'Leary, E. S., Schoenfeld, E. R., Stevens, R. G., Kabat, G. C., Henderson, K., Grimson, R., Gammon, M. D., Leske, M. C., et for the Electromagnetic Fields and Breast Cancer on Long Island Study Group, 8-15-2006. Shift Work, Light at Night, and Breast Cancer on Long Island, New York. *American Journal of Epidemiology*, 164: 358-366.

- Obayashi, K., Saeki, K., Iwamoto, J., Ikada, Y., et Kurumatani, N., 2013. Exposure to light at night and risk of depression in the elderly. *Journal of Affective Disorders*, 151: 331-336.
- Obayashi, K., Saeki, K., Iwamoto, J., Okamoto, N., Tomioka, K., Nezu, S., Ikada, Y., et Kurumatani, N., 2012. Exposure to Light at Night, Nocturnal Urinary Melatonin Excretion, and Obesity/Dyslipidemia in the Elderly: A Cross-Sectional Analysis of the HEIJO-KYO Study. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 98: 337-344.
- Oh, J. H., Yoo, H., Park, H. K., et Do, Y. R., 6-18-2015. Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night. *Sci Rep*, 5: 11325-.
- Oosterman, J. E., Kalsbeek, A., la Fleur, S. E., et Belsham, D. D., 2015. Impact of nutrients on circadian rhythmicity. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 308: R337-.
- Parent, M. E., El Zein, M., Rousseau, M. C., Pintos, J., et Siemiatycki, J., 11-1-2012. Night work and the risk of cancer among men. *Am. J. Epidemiol.*, 176: 751-759.
- Petrov, M. E., Clark, C. B., Molzof, H. E., Johnson, R. L., Jr., Cropsey, K. L., et Gamble, K. L., 2014. Sleep Strategies of Night-Shift Nurses on Days Off: Which Ones are Most Adaptive? *Front Neurol.*, 5: 277-.
- Popovich, I. G., Zabezhinski, M. A., Panchenko, A. V., Piskunova, T. S., Semenchenko, A. V., Tyndyk, M. L., Yurova, M. N., et Anisimov, V. N., 2013. Exposure to light at night accelerates aging and spontaneous uterine carcinogenesis in female 129/Sv mice. *Cell Cycle*, 12: 1785-1790.
- Portnov, B. A., Stevens, R. G., Samociuk, H., Wakefield, D., et Gregorio, D. I., 2016. Light at night and breast cancer incidence in Connecticut: An ecological study of age group effects. *Science of the Total Environment*, 572: 1020-1024.
- Puttonen, S., Viitasalo, K., et Hämäläinen, M., 2011. Effect of Shiftwork on Systemic Markers of Inflammation. *Chronobiology International*, 28: 528-535.
- Rangtall, F. et coll., 2016. Two hours of evening reading on a self-luminous tablet vs. reading a physical book does not alter sleep after daytime bright light exposure. *Sleep Med*, 23: 111-8.
- Rao, D., Yu, H., Bai, Y., Zheng, X., et Xie, L., 2015. Does night-shift work increase the risk of prostate cancer? a systematic review and meta-analysis. *Onco. Targets. Ther.*, 8: 2817-2826.
- Rea, M. S. et coll., 2014. The potential of outdoor lighting for stimulating the human circadian system. Technology and business for development - ee Publishers. 10 pages, <http://www.ee.co.za/article/potential-outdoor-lighting-stimulating-human-circadian-system.html>.
- Rea, M. S. et Figueiro, M. G., 2016. Response to the 2016 AMA Report on LED Lighting. 8 pages.
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., et Hamner, R., 2011. Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Lighting Res. Technol.*, 0: 1-12.
- Rea, M. S. et Ouellette, M. J., 1991. Relative visual performance: A basis for application. *Lighting Research and Technology*, 23: 135-144.
- Richez, J. P. et Lemarié, J., 2011. Rayonnements optiques artificiels. Premiers pas en terre méconnue. INRS - TS n°722. 35 pages.

- Roby, J., Aubé, M., Morin-Paulhus, A., Beauchesne, W., et Cyr, L.-O., 2016. LSPDD: Lamp Spectral Power Distribution Database - Base de données spectrales de lampes. Cegep de Sherbrooke, <http://galileo.graphyics.cegepsherbrooke.qc.ca/app/fr/lamps/2656>.
- Rothman, K. J., Greenland, S., and Lash, T. L. 2008. Modern Epidemiology (Ed.), Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins 9780781755641.
- Rufiange, M., Beaulieu, C., Lachapelle, P., et Dumont, M., 2007. Circadian light sensitivity and rate of retinal dark adaptation in indoor and outdoor workers. *J. Biol. Rhythms*, 22: 454-457.
- Rybnikova, N. A., Haim, A., et Portnov, B. A., 2016a. Does artificial light-at-night exposure contribute to the worldwide obesity pandemic? *Journal of obesity*.
- Rybnikova, N. A., Haim, A., et Portnov, B. A., 2016b. Is prostate cancer incidence worldwide linked to artificial light at night exposures? Review of earlier findings and analysis of current trends. *Arch. Environ. Occup. Health*, 1-12.
- Rybnikova, N., Haim, A., et Portnov, B. A., 2015. Artificial Light at Night (ALAN) and breast cancer incidence worldwide: A revisit of earlier findings with analysis of current trends. *Chronobiology International*, 32: 757-773.
- Salim, V. et Wright, S., 2013. Trafford LED Street Lighting Programme Health Impact Assessment. Centre for Health Impact Assessment. 94 pages.
- Santé Canada, 2015. Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz. 18 pages, http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/pdf/consult/2014/safety_code_6-code_securite_6/final-finale-fra.pdf.
- Schernhammer, E. S., Laden, F., Speizer, F. E., Willett, W. C., Hunter, D. J., Kawachi, I., Fuchs, C. S., et Colditz, G. A., 6-4-2003. Night-shift work and risk of colorectal cancer in the nurses' health study. *J. Natl. Cancer Inst.*, 95: 825-828.
- Schwartzbaum, J., Ahlbom, A., et Feychting, M., 2007. Cohort study of cancer risk among male and female shift workers. *Scand. J. Work Environ. Health*, 33: 336-343.
- Sletten, T. L., Revell, V. L., Middleton, B., Lederle, K. A., et Skene, D. J., 2009. Age-Related Changes in Acute and Phase-Advancing Responses to Monochromatic Light. *J Biol Rhythms*, 24: 73-84.
- Smith, K. A., Schoen, M. W., et Czeisler, C. A., 2004. Adaptation of human pineal melatonin suppression by recent photic history. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 89: 3610-3614.
- Smith, M. R. et Eastman, C. I., 2009. Phase Delaying the Human Circadian Clock with Blue-Enriched Polychromatic Light. *Chronobiol Int*, 26: 709-725.
- Stevens, R. G., 1987. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. *Am. J. Epidemiol.*, 125: 556-561.
- Straif, K., Baan, R., Grosse, Y., Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Altieri, A., Benbrahim-Tallaa, L., et Coglian, V., 2007. Carcinogenicity of shift-work, painting, and fire-fighting. *Lancet Oncol.*, 8: 1065-1066.
- Suarez, D. et Nguyen, D., 2014. Étude de l'éclairage aux diodes électroluminescentes aux boulevards Alexis-Nihon et Toupin - Rapport d'éclairage. Ville de Montréal. 31 pages.

- Thapan, K., Arendt, J., et Skene, D. J., 2001. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J. Physiol*, 535: 261-267.
- The Paleo mom, 2015. Circadian rhythm. Page consultée le 12 décembre 2016, <https://www.thepaleomom.com/the-new-science-of-sleep-wake-cycles/>.
- Thune, I., Brenn, T., Lund, E., et Gaard, M., 1997. Physical activity and the risk of breast cancer. *N. Engl. J. Med.*, 336: 1269-1275.
- Travis, R. C., Balkwill, A., Fensom, G. K., Appleby, P. N., Reeves, G. K., Wang, X. S., Roddam, A. W., Gathani, T., Peto, R., Green, J., Key, T. J., et Beral, V., 2016. Night Shift Work and Breast Cancer Incidence: Three Prospective Studies and Meta-analysis of Published Studies. *J. Natl. Cancer Inst.*, 108.
- Tsai, R. J., Luckhaupt, S. E., Sweeney, M. H., et Calvert, G. M., 2014. Shift work and cancer screening: do females who work alternative shifts undergo recommended cancer screening? *Am. J. Ind. Med.*, 57: 265-275.
- Turek, F. W., Joshu, C., Kohsaka, A., Lin, E., Ivanova, G., McDearmon, E., Laposky, A., Olson, S., Easton, A., Jensen, D. R., Eckel, R. H., Takahashi, J. S., et Bass, J., 2005. Obesity and Metabolic Syndrome in Circadian Clock Mutant Mice. *Science*, 308: 1043-1045.
- Tynes, T., Hannevik, M., Andersen, A., Vistnes, A. I., et Haldorsen, T., 1996. Incidence of breast cancer in Norwegian female radio and telegraph operators. *Cancer Causes Control*, 7: 197-204.
- Van Dycke, K. C., Rodenburg, W., van Oostrom, C. T., van Kerkhof, L. W., Pennings, J. L., Roenneberg, T., van Steeg, H., et van der Horst, G. T., 2015. Chronically Alternating Light Cycles Increase Breast Cancer Risk in Mice. *Curr. Biol.*, 25: 1932-1937.
- Vartanian, G. V., Li, B. Y., Chervenak, A. P., Walch, O. J., Pack, W., Ala-Laurila, P., et Wong, K. Y., 2015. Melatonin suppression by light in humans is more sensitive than previously reported. *J Biol Rhythms*, 30: 351-354.
- Vauthier, Q., 2010. Astrophotographie numérique à haute résolution. <http://www.sc-astro.com/dossiers/naturelumiere2.htm>.
- Ville de Montréal, 2016. Ensemble des documents fournis par la Ville de Montréal concernant leur projet de conversion de luminaires de rue DEL.
- Wang, F., Yeung, K. L., Chan, W. C., Kwok, C. C. H., Leung, S. L., Wu, C., Chan, E. Y. Y., Yu, I. T. S., Yang, X. R., et Tse, L. A., 11-1-2013. A meta-analysis on dose response relationship between night shift work and the risk of breast cancer. *Annals of Oncology*, 24: 2724-2732.
- Wang, F., Dai, J., Li, M., Chan, W. c., Kwok, C. C., Leung, S. l., Wu, C., Li, W., Yu, W. c., Tsang, K. h., Law, S. h., Lee, P. M., Wong, C. K., Shen, H., Wong, S. Y., Yang, X. R., et Tse, L. A., 8-12-2016. Risk assessment model for invasive breast cancer in Hong Kong women. *Medicine (Baltimore)*, 95: e4515-.
- Wang, X., Ji, A., Zhu, Y., Liang, Z., Wu, J., Li, S., Meng, S., Zheng, X., et Xie, L., 9-22-2015. A meta-analysis including dose-response relationship between night shift work and the risk of colorectal cancer. *Oncotarget.*, 6: 25046-25060.
- Ward, E. M., Schulte, P. A., Straif, K., Hopf, N. B., Caldwell, J. C., Carreon, T., DeMarini, D. M., Fowler, B. A., Goldstein, B. D., Hemminki, K., Hines, C. J., Pursiainen, K. H., Kuempel, E., Lewtas, J., Lunn, R. M.,

- Lyngé, E., McElvenny, D. M., Muhle, H., Nakajima, T., Robertson, L. W., Rothman, N., Ruder, A. M., Schubauer-Berigan, M. K., Siemiatycki, J., Silverman, D., Smith, M. T., Sorahan, T., Steenland, K., Stevens, R. G., Vineis, P., Zahm, S. H., Zeise, L., et Coglianó, V. J., 2010. Research recommendations for selected IARC-classified agents. *Environ. Health Perspect.*, 118: 1355-1362.
- West, K. E., Jablonski, M. R., Warfield, B., Cecil, K. S., et coll., 2011. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependant suppression of melatonin in humans. *J Appl Physiol*, 110: 619-626.
- Zeitzer, J. M., Dijk, D. J., Kronauer, R., Brown, E., et Czeisler, C., 8-1-2000. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *J. Physiol*, 526 Pt 3: 695-702.
- Zissis, G. al., 2013. LEDs and solid-state lighting: the potential health issues. 13 pages.
- Zubek, A., 2016. Rapport d'évaluation des niveaux de rayonnements RF selon les normes du Code de sécurité 6 pour l'installation Énergère (Hydro-Québec). Yves R.Hamel et Associés inc. 14 pages.