



LES DANGERS DES LED

Francis VENTER

francis.venter@gmail.com

www.ascen.be

www.nuitdelobscurite.be

1. Avant-propos

Il est vrai que les LED (Light-Emitting Diodes ou Diodes électroluminescentes) ont le vent en poupe et sont de plus en plus utilisées, et donc vendus par certaines firmes commerciales dont les slogans publicitaires du style « *moins consommation* » et « *moins production de CO₂* » ressemblent un peu trop souvent à du green washing.

Un document¹ fort intéressant sur les LED publié par l'International Dark Sky Association constitue l'essentiel de l'information pour le texte qui suit.

2. Introduction

Une tendance récente en matière d'éclairage extérieur a été le passage vers une utilisation généralisée de sources de lumière blanche. Il est toutefois important de reconnaître que toutes les sources de lumière blanche ne sont pas identiques : certaines émettent beaucoup plus d'énergie que d'autres dans la partie bleue du spectre visible. Parallèlement aux développements des recherches sur la vision humaine, il y a eu une accumulation de preuves sur les impacts négatifs qui peuvent être associés aux longueurs d'onde inférieures à 500 nanomètres.

Bien que la majeure partie des recherches expliquant les avantages de la lumière blanche pour la visibilité aient été produites par des sociétés d'éclairagistes, des publications scientifiques ont aussi montré qu'un certain nombre de conséquences indésirables sont bien présentes pour la vision, mais également dans les domaines de l'épidémiologie, de l'astronomie, de la préservation des paysages, de la biologie...

Le spectre d'émission des sources lumineuses blanches diffère des lampes à Décharge Haute Intensité (HID) les plus courantes utilisées dans les zones urbaines. Il diffère aussi de celui de l'éclairage routier où l'on retrouve essentiellement des lampes au Sodium à Haute Pression (NaHP) et à Basse Pression (NaBP). Ainsi, ces sources HID représentent un changement important dans l'utilisation de l'éclairage extérieur, car elles produisent une plus grande quantité de rayonnement dans la partie bleue du spectre que les NaHP. La plupart des émissions des lampes NaHP se situent entre 550 nm et 650 nm. Pour ces lampes, le rapport entre quantité de rayonnement en dessous de 500 nm et quantité

¹ IDA (International Dark-Sky Association) - *Questions sur la visibilité, l'environnement naturel et astronomique liées à l'éclairage extérieur blanc avec une forte composante bleue - 4 mai 2010 (Traduction française : Association LICORNESS, Septembre 2010, Alain LE GUE et le contrôle scientifique de Nicolas BESSOLAZ)*

totale dans le spectre visible (de 400 nm à 650 nm) est de 7%. Pour les sources comme les lampes fluorescentes (y compris celles à induction) et comme les Halogénures (ou iodures) Métalliques (HM) le rapport est d'environ 20% à 30%. Pour les sources à LED blanches, ce rapport est de l'ordre de 20% à 50% (voir **Figure 1**).

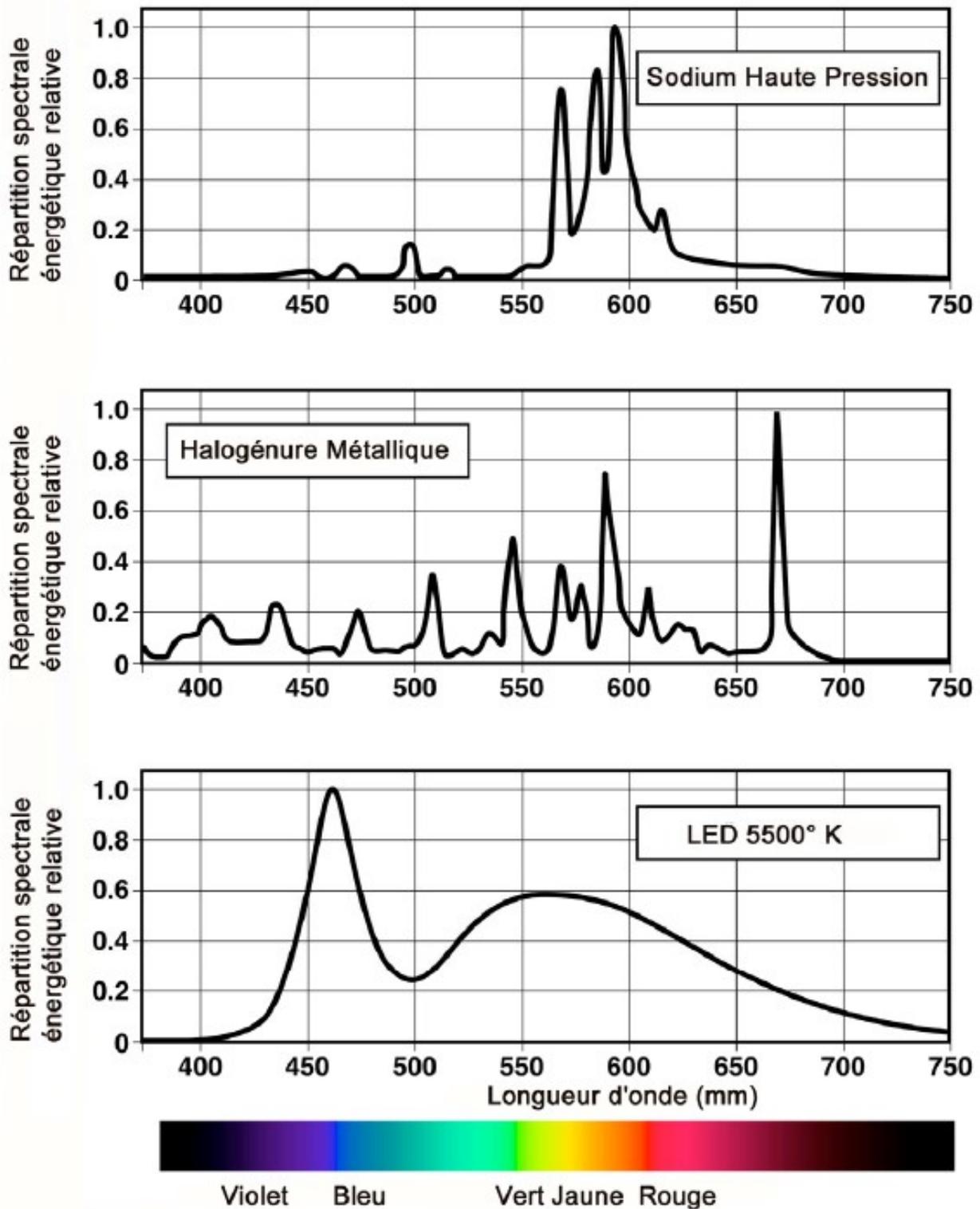


Figure 1. Répartition spectrale énergétique typiques des lampes NaHP (orange) ; halogénure métallique à brûleur céramique (cyan) ; LED blanche (bleue).

Les fabricants de LED insistent sur le fait que l'on s'attend à ce que ce rapport soit moins élevé au fur et à mesure que la technologie des LED évoluera. Et, en effet, quelques

fabricants ont déjà annoncé la venue sur le marché de produits LED à « *composante bleue réduite* » pour l'éclairage extérieur.

Mais si plus de lampes à lumière blanche sont utilisées dans l'éclairage extérieur, il est évident que la quantité de lumière à forte composante bleue augmentera sensiblement dans notre environnement.

La température de couleur corrigée (TCC) est couramment utilisée pour décrire la perception des couleurs pour les sources lumineuses blanches. Cependant il s'agit d'une mesure insuffisante pour décrire la quantité d'énergie émise dans la partie bleue du spectre. Par exemple, les sources HM et LED ayant la même TCC peuvent avoir des quantités d'émission sensiblement différentes au-dessous de 500 nm. En outre les spectres des lampes qui peuvent avoir des pics d'émission importants, comme les HM et les LED, concentrent leur énergie dans une région du spectre qui est très sensible pour l'environnement, ce qui entraînent donc un impact disproportionné. Ainsi, il faut mieux considérer les impacts provoqués par l'éclairage nocturne en rapport avec la répartition de l'énergie des lampes en fonction de la longueur d'onde ainsi que la réponse concomitante des systèmes biologiques.

L'éclairage LED mérite un examen plus attentif dû à ce que la proportion d'énergie est généralement plus élevée quand elle est émise au-dessous de 500 nm (le pic d'émission se situant vers 450-460 nm). L'accent doit être porté sur l'excès de rayonnement bleu des LED « *blanc froid* » mises sur le marché. Les LED ont de nombreux avantages potentiels, notamment une consommation d'énergie réduite, la technologie n'étant pas dangereuse en soi, mais les indications décrites ci-après montrent la complexité de cette question et les soins qui devraient être apportés lors de l'utilisation des sources lumineuses blanches comportant un fort rayonnement bleu.

3. Terminologie

Dans la discussion qui suit, le terme « *lumière à forte composante bleue* » sera souvent utilisé pour désigner tous les types de lumière blanche. Le terme est utilisé par opposition à des sources à forte composante jaune (principalement les NaHP) et inclut des sources lumineuses avec des proportions variables de lumière bleue, généralement définies comme ayant une longueur d'onde inférieure à 500 nm.

Ce terme ne signifie pas que la lumière est réellement bleue, bien que certaines sources étudiées ont une tonalité bleue. Des exemples de telles sources de lumière à forte composante bleue comprennent les lampes fluorescentes, à induction, les LED blanches et les halogénures métalliques.

4. Processus physique

Les bases de la physique décrivant l'interaction de la lumière avec les molécules et les aérosols ont été décrites au 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle. La diffusion par les molécules a été expliquée en premier par John William Strutt et par le baron Rayleigh. Elle a depuis été appelée « *diffusion Rayleigh* ».

La diffusion Rayleigh a un lien très fort avec les longueurs d'onde et avec le diamètre des molécules σ_R . Donc la diffusion qui en résulte est proportionnelle à la quatrième puissance

inverse de la longueur d'onde.

$$\sigma_R \propto \lambda^{-4} \quad (1)$$

Dans notre expérience quotidienne, la conséquence de cette dispersion est plus importante dans les longueurs d'onde les plus courtes. Ce phénomène est visible pendant la journée et explique la couleur bleue du ciel. La conséquence pour les sources de lumière artificielle avec de fortes émissions de lumière bleue est une plus grande diffusion moléculaire par rapport aux diffusions avec des sources de plus grande longueur d'onde.

Les valeurs suivantes peuvent être utilisées pour décrire la section efficace de diffusion des molécules dans de larges parties du spectre comme les bandes passantes astronomiques V (visible) et B (bleu) centré sur 550 nm et 440 nm.

$$\sigma_R(550nm) = 4.6e10^{-27} cm^2$$

$$\sigma_R(440nm) = 1.136e10^{-26} cm^2$$

Le rapport entre les deux sections transversales ($11,36/4,6 \approx 2,5$) montre qu'une lumière aux alentours de 440 nm est diffusée par les molécules 2,5 fois plus qu'une lumière dont la longueur d'onde est de 550 nm. Comme la plupart des sources lumineuses émettent sur toute une gamme de longueurs d'onde, la connaissance du total de la diffusion Rayleigh par la lumière d'une source donnée est déterminée par une pondération de la répartition énergétique spectrale de la source en utilisant la relation (1).

La diffusion efficace respective des différentes sources lumineuses est appelé « *Indice de diffusion Rayleigh* » (IDR). Les valeurs d'IDR pour plusieurs types de lampes divisé par le IDR des NaHP sont données dans la **figure 2**.

Ces résultats montrent que la lumière des LED blanches se diffuse sur les molécules 1,2 à 2 fois plus que la lumière émise par une lampe NaHP, la lumière des lampes fluorescentes se diffuse de 1,5 à 1,7 fois plus, et celle des halogénures métalliques à brûleur céramique de 1,5 à 1,8 fois plus.

L'atmosphère n'est pas entièrement composée de molécules gazeuses : dans la basse atmosphère, les aérosols et les particules fines sont très présents. La théorie décrivant l'interaction de la lumière avec les aérosols a été développée par Mie.

Bien que la théorie soit complexe et dépende de la taille des particules et de leur composition, pour les particules les plus communes de la basse atmosphère, la diffusion sur les aérosols présente encore, pour les courtes longueurs d'onde, une tendance à une plus grande diffusion, avec des sections de particules σ_a proportionnelles à l'inverse de la longueur d'onde.

$$\sigma_a \propto \lambda^{-1}$$

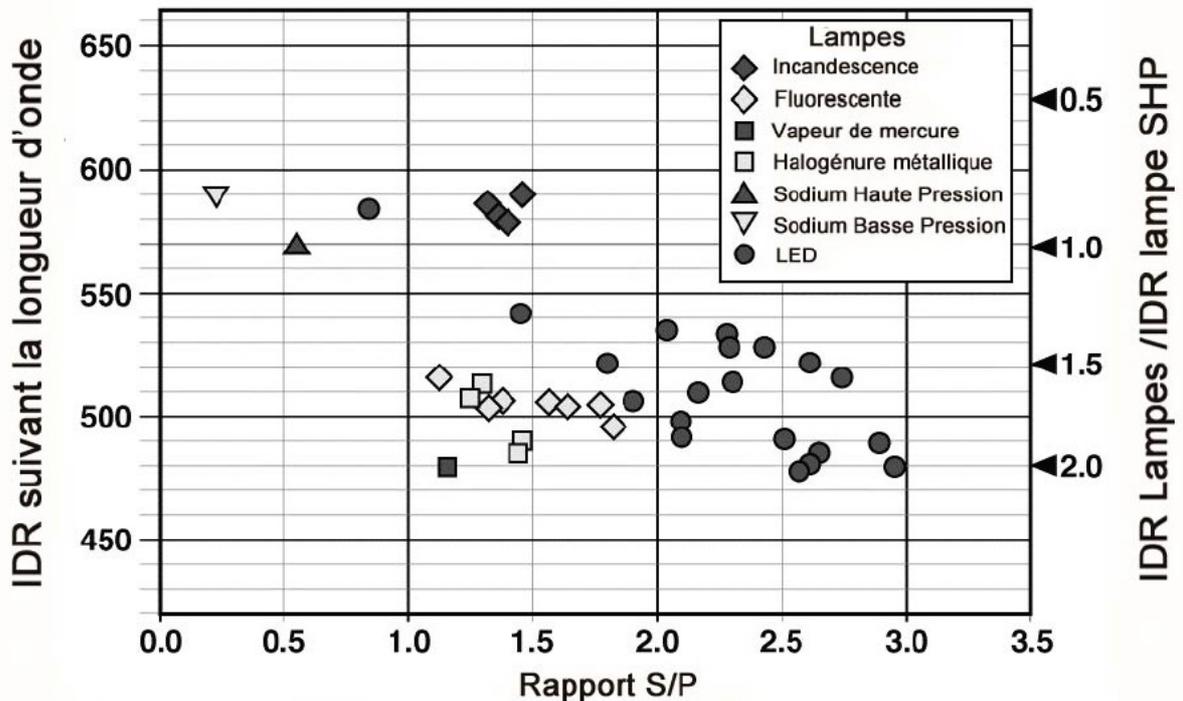


Figure 2 : Indice de Diffusion Rayleigh (IDR) effectif des lampes NaHP et un IDR maximum d'un échantillon de lampes types suivant la longueur d'onde. Et leur rapport scotopique (vision de nuit) / photopique (vision de jour) : S / P.

Dans la plupart des cas, la diffusion totale des aérosols est supérieure à celle des molécules mais la distribution angulaire est très différente : la diffusion des aérosols est très fortement orienté vers l'avant, c'est-à-dire que la lumière diffusée par les particules est la plupart du temps légèrement déviée de sa direction initiale.

La diffusion des molécules gazeuses est quant à elle plus équitablement répartie dans toutes les directions. La conséquence aisément observable de la dépendance angulaire de la diffusion des aérosols, est que le bleu du ciel tend à devenir à la fois plus lumineux et plus laiteux quand on l'observe à proximité du soleil.

La conséquence sur la luminosité du ciel nocturne due à éclairage artificiel est que, malgré une diffusion globale plus importante des aérosols dans la plupart des situations, l'augmentation de la luminosité du fond du ciel proche du zénith tend à être dominée par la diffusion Rayleigh, avec sa dépendance beaucoup plus forte à la longueur d'onde.

Dans une véritable atmosphère, comprenant des molécules et des aérosols, la forte dépendance de la diffusion de Rayleigh à l'égard de la longueur d'onde est diminuée mais elle n'est pas supprimée.

Cela implique, avec une atmosphère plus brumeuse, comme dans les zones urbaines polluées, que le ciel ait tendance à être moins bleu et plus laiteux. Dans de telles situations les impacts des sources de lumière à forte composante bleue par rapport aux sources jaunes comme les NaHP sont encore plus grandes, mais ils sont diminués dans le cas où l'atmosphère a une faible teneur en aérosols.

Enfin, les diffusions de tous types conduisent à une conséquence importante : lorsque la lumière se propage à travers l'atmosphère sur de grandes distances, la lumière est absorbée de plus en plus le long du faisceau lumineux, et du fait de la dépendance avec la longueur d'onde, la lumière bleue est absorbée plus que le jaune et à fortiori le rouge.

Cet effet est de plus en plus fort pour les atmosphères chargées en aérosols. La conséquence de cet effet est la couleur rouge des nuages au coucher (ou au lever) du soleil près de l'horizon. Pour l'éclairage artificiel, son effet est tel que les impacts d'une diffusion accrue occasionnée par la lumière bleue sont plus grands près des sources lumineuses, comme dans les villes ou à proximité, mais ils diminuent à mesure que l'on s'éloigne de la source lumineuse.

La relation étroite entre une diffusion et une absorption accrue doit être interprétée avec précaution. Bien que l'impact d'une lumière à forte composante bleue décroît plus rapidement avec la distance qu'avec des sources à forte composante jaune, cet impact décroissant est le résultat de la dispersion de la lumière à courte longueur d'onde hors du faisceau lumineux dans les zones proches des villes.

En d'autres termes, l'impact décroissant sur les plus grandes distances se fait au détriment des impacts croissant sur les plus proches distances. Pour les atmosphères pures, moins la lumière est diffusée, plus les impacts sont répartis sur une zone plus vaste, car dans une atmosphère chargée, plus la lumière est diffusée plus est important l'impact global sur la luminosité du ciel et plus sa concentration est importante près des sources lumineuses.

5. Vision Humaine

À mesure que les niveaux d'éclairement ambiants baissent, l'œil humain s'adapte aux niveaux d'illumination plus faibles, la performance visuelle devenant alors plus complexe. La vision humaine nocturne en présence d'éclairage artificiel implique des cellules visuelles - à savoir les bâtonnets et les cônes situés dans la rétine - et un mélange complexe d'actions dépendant des réponses scotopiques² (bâtonnets) et photopiques³ (cônes).

Les bâtonnets, qui sont plus sensibles aux longueurs d'onde bleues, ont renforcé l'idée que la lumière bleue est visuellement plus efficace aux basses luminances, et que l'éclairage nocturne artificiel devrait favoriser l'utilisation d'ampoules dont le spectre possède une forte composante bleue.

La dynamique de la variation de la réponse spectrale visuelle (l'effet Purkinje⁴) à des niveaux de luminance mésopique⁵ a été étudiée par plusieurs chercheurs qui ont proposé une courbe de sensibilité pour la fonction mésopique de l'œil où à la fois les cônes et des bâtonnets contribuent à la vision. Toutefois, l'incertitude demeure sur la façon dont des

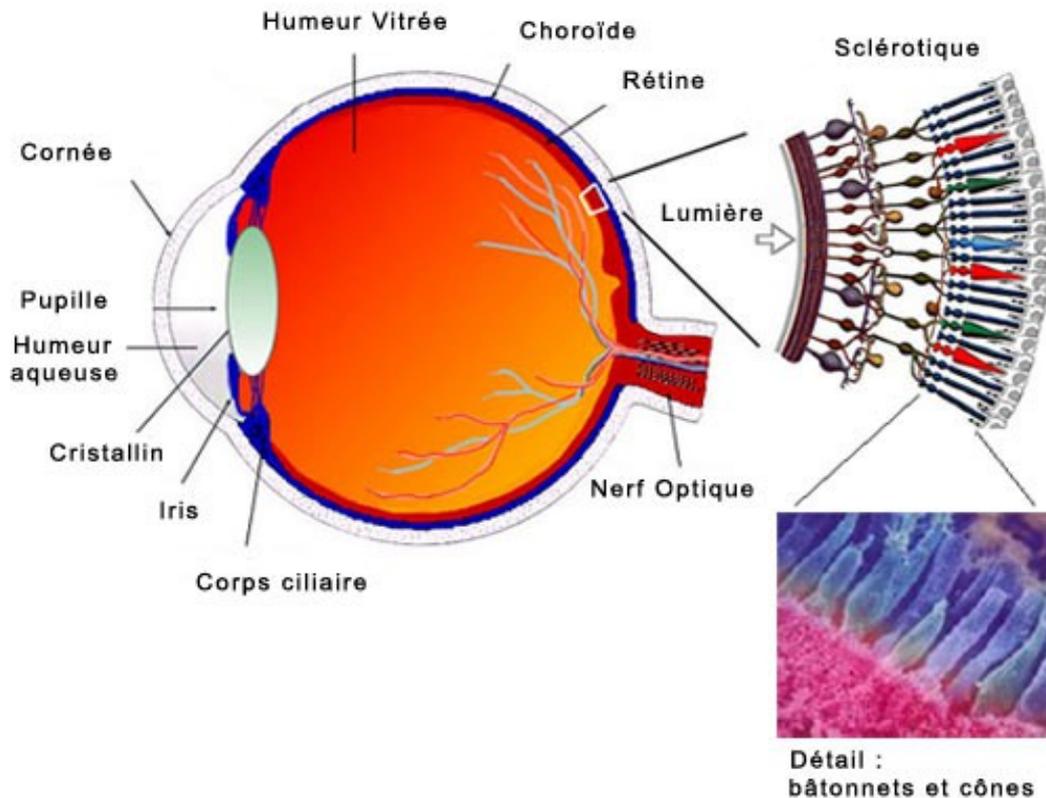
2 *On appelle vision scotopique (du grec skotos, obscurité), la « forme » particulière que prend la vision de nuit ou en conditions de faible éclairage.*

3 *La vision photopique est la vision de jour par opposition à la vision scotopique qui est la vision de nuit. La vision photopique se fait principalement grâce aux cônes se trouvant sur la rétine de l'œil. La sensibilité de l'œil en vision photopique n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde. Le maximum de sensibilité de l'œil est obtenu pour une longueur d'onde de 555 nanomètres.*

4 *L'effet Purkinje est un déplacement de la sensibilité de l'œil humain vers le bleu lorsque la luminosité ambiante diminue. Rappelons que l'homme est un être diurne, sa vision, le jour s'étend du rouge (780 nm) au violet (400 nm) avec le jaune-vert au centre.*

5 *Caractère de la vision quand la rétine est excitée par une lumière de faible intensité.*

caractéristiques visuelles critiques dans la gamme mésopique peuvent être traduites dans les pratiques de l'éclairage.



En particulier, différentes mesures de la performance visuelle donnent différentes courbes mésopiques. Les mesures du temps de réaction périphériques ont permis de déterminer que l'effet Purkinje commence dès une valeur élevée de $1,0 \text{ cd/m}^2$, bien que les points de mesures de la luminance correspondent à un niveau d'adaptation 10 fois inférieur (environ $0,1 \text{ cd/m}^2$).

D'autres études ont modélisé la fonction mésopique avec les cônes S jouant un rôle clé plutôt que les bâtonnets. Parce que les niveaux cibles de l'éclairage extérieur ne se superposent que sur la partie de la plage mésopique la plus lumineuse, le comportement exact et l'apparition de la sensibilité spectrale de l'œil est une question cruciale.

Suivant les études et les mesures de performance mises en avant, la pertinence de la conception d'éclairage extérieur peut être très importante, ou à peine plus qu'une question académique.

De toute évidence, il n'y a pas de réaction mésopique unique.

Malgré la complexité et l'incertitude de la vision aux niveaux lumineux mésopique, et malgré la position officielle de l'Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), quelques observateurs et fabricants recommandent néanmoins l'application ou appliquent réellement des facteurs de correction du rendement lumineux des produits d'éclairage à forte composante bleue.

Bien que les facteurs de correction soient souvent présentés à titre d'essai, de nombreuses personnes ont interprété les préconisations plus concrètement que les auteurs des recherches eux-mêmes : on peut trouver sur Internet avec les termes « *multiplicateurs d'efficacité de lumen* » et « *lumen scotopique* » des milliers de références dont de nombreuses sur les sites des fabricants. Dans le cas de la lumière à forte composante bleue, de telles fonctions de pondération augmentent l'efficacité apparente de l'éclairage associé et changent fondamentalement l'économie de ces systèmes.

Le 15 novembre 2009, l'IESNA a publié un communiqué argumenté précisant que toutes ses recommandations doivent être employées avec la « *fonction d'efficacité lumineuse photopique* » telles que le définit le manuel technique d'éclairagisme de l'IESNA, sauf s'il existe des exceptions spécifiques indiquées dans ce document. L'utilisation des fonctions de pondération spectrale comme celles employées pour déterminer des rapports S/P, les « *lumens scotopiques* » ou « *multiplicateurs d'efficacité de lumen* » ne sont pas approuvées⁶.

Le 1^{er} avril 2009, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a publié un Rapport du Comité Technique « *performances visuelles dans les spectres mésopique* » détaillant un système recommandé pour la photométrie mésopique. Leurs conclusions est qu'il y a une transition linéaire logarithmique entre les modes photopique et scotopique, mélangeant les luminances et les systèmes chromatiques de l'œil, ce qui constitue un accord satisfaisant avec les expériences de laboratoire.

Le résultat des ajustements de luminance mésopique de la CIE n'est pas aussi dramatique que les multiplicateurs d'efficacité de lumen pour la lumière à forte composante bleue.

Bien que le système photométrique mésopique proposé se base sur un grand nombre d'études visant à élaborer un système pratique pour l'ingénierie de l'éclairage, il n'aborde pas certaines questions⁷ qui compliquent ou déprécient les avantages de la lumière à forte composante bleue au niveau mésopique.

6. Réaction pupillaire

Plusieurs études ont montré que la taille des pupilles est plus fortement dépendante de l'intensité de la lumière bleue qu'avec la luminance photopique⁸, avec un effet de plus en plus important avec des niveaux de luminance plus faibles.

La lumière à forte composante bleue induit des tailles de pupille graduellement plus petites que la lumière jaune. Bien que l'on suppose qu'elle soit parfois influencée par les réponses des bâtonnets (vision scotopique⁹), la recherche indique que la taille des pupilles

6 Aux USA il a été proposé l'utilisation d'une autre mesure du flux lumineux des sources dans le cas d'une utilisation en vision photopique. C'est le « *Multiplicateurs d'Efficacité Lumen* », il corrèle l'efficacité d'une source lumineuse de référence (SHP en général) et les autres sur différentes longueurs d'onde de la vision mésopique. <http://www.patmullins.com/lem.html>. L'autre facteur de correction proposé et qui peut être appliquée en vision photopique pour trouver une lumière utilisable avec une source de lumière donnée pour l'éclairage, s'appelle lumen scotopique.

7 Que nous verrons par la suite...

8 La vision photopique est la vision de jour par opposition à la vision scotopique qui est la vision de nuit. La vision photopique se fait principalement grâce aux cônes se trouvant sur la rétine de l'œil. La sensibilité de l'œil en vision photopique n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde. Le maximum de sensibilité de l'œil est obtenu pour une longueur d'onde de 555 nanomètres..

9 On appelle vision scotopique (du grec *skotos*, obscurité), la « *forme* » particulière que prend la vision de nuit ou en

peut dépendre de la sensibilité au bleu des cônes S, une combinaison des réponses des bâtonnets et des cônes avec une sensibilité maximale à 490 nm ou celle des cônes L moins celle des cônes M¹⁰.

Aux basses luminances, une plus petite taille de la pupille et le faible éclairement rétinien qui en résulte, peuvent réduire les performances visuelles pour des tâches plus étroitement liées avec la vision fovéale¹¹ ou avec une luminance photopique.

7. Adaptation

Le processus de la vision scotopique a un seuil de détection de la lumière beaucoup plus faible que la vision photopique. Toutefois, les systèmes scotopique et photopique ne sont pas des canaux visuels indépendants qui sont combinés de manière additive. L'activité scotopique semble supprimer la fonction de couleur (photopique), alors que l'activité photopique supprime la fonction scotopique en basse luminosité, et la sensibilité scotopique diminue pendant que les bâtonnets sont saturés dans la gamme mésopique¹² supérieure.

La synchronisation et la durée de l'adaptation de l'œil entre les modes photopique et scotopique est également très importante. En particulier, **l'exposition à la lumière bleue augmente le temps d'adaptation requis pour une sensibilité scotopique maximum**. Cette relation entre l'adaptation à l'obscurité et la couleur de l'éclairage est communément utilisée par les militaires et les astronomes qui emploient l'éclairage rouge pour préserver leur vision scotopique.

Ainsi, tandis que la réponse scotopique est plus sensible à la lumière bleue de faible intensité, des intensités plus élevées de lumière bleue, y compris des intensités dans le domaine mésopique, inhibent l'adaptation à l'obscurité et semblent supprimer la réponse scotopique. Les implications dans le monde réel avec des sources d'éblouissement, des uniformités insuffisantes, des transitions difficiles, des grandes différences de niveaux d'éclairement et des échelles de temps d'adaptation sont importantes à examiner et encore mal comprises.

8. Éblouissement

Dans l'implantation des éclairages extérieurs, l'éblouissement est rarement quantifié mais joue un rôle important dans le processus de la vision humaine. Il peut produire un sentiment d'inconfort, qui peut se manifester dans le détournement du regard, des clignements, du strabisme, et il peut en plus réduire la performance visuelle par un éblouissement totalement handicapant.

Les premières études ont montré que **la lumière bleue provoque plus d'éblouissement que les autres lumières**. Des études postérieures ont confirmé ce fait et montrent que la

conditions de faible éclairage.

10 *Les différents types de cônes sont sensibles et ont des pics de sensibilité maximum différents, les cônes S vers 420nm (bleu), les cônes M vers 534 nm (jaune vert), les cônes L vers 564nm (jaune-rouge), les bâtonnets le sont vers 498 nm (cyan-vert).*

11 *La fovéa, la zone centrale de la macula, est la zone de la rétine où la vision des détails est la plus précise. Elle est située dans le prolongement de l'axe optique de l'œil. La fovéa est peuplée uniquement de cônes, et nous permet la meilleure résolution optique.*

12 *Caractère de la vision quand la rétine est excitée par une lumière de faible intensité.*

réponse des cônes S (pic vers 420 nm) est plus étroitement corrélée avec l'éblouissement inconfortable que les bâtonnets (pic vers 505 nm).

La lumière bleue dans la gamme 350-430 nm a également été décrite comme la cause d'une fluorescence du cristallin de l'œil ayant pour résultat un voile de luminance intraoculaire. Les plaintes au sujet des « *phares bleus* » sur les automobiles indiquent que **les phares à forte composante bleue sont perçus comme plus éblouissants** que les phares halogènes conventionnels.

9. Vieillesse de l'œil

Avec le vieillissement de l'œil, ce dernier demande plus de lumière et un meilleur contraste pour une même acuité visuelle et devient plus sensible à l'éblouissement. La transparence oculaire est réduite, en particulier aux longueurs d'onde bleue, qui avec l'âge, est combinée avec la réduction relative de la taille de la pupille et une moindre illumination rétinienne.

Des yeux plus âgés sont aussi plus sujets à des maladies telles que la cataracte, la dégénérescence maculaire, la presbytie et le glaucome, même si les études ne sont pas concluantes quant à savoir s'il y a des conséquences dues aux spectres lumineux.

Toutefois, puisque les sources à forte composante bleue produisent relativement plus d'éblouissement gênant et que **les personnes âgées sont plus sensibles à l'éblouissement**, les éclairages extérieurs à forte composante bleue sont présumés avoir un plus grand impact sur les personnes âgées que sur les autres groupes d'âge.

10. Les effets sur la santé

Le rythme circadien humain est influencé par des photorécepteurs non visuels de la rétine, avec une réponse maximum vers 460 nanomètres dans la partie bleue du spectre (voir la **figure 3**) ; **l'exposition à la lumière nocturne, en particulier la lumière à forte composante bleue, supprime la production de la mélatonine.**

La mélatonine est rencontrée chez les animaux et les humains, et même chez quelques plantes. Chez l'homme, cette hormone agit comme régulateur du « *cycle veille-sommeil* », et joue un rôle dans le système immunitaire. La lumière peut être efficacement utilisée en intérieur, pour influencer le rythme circadien, et peut avoir plusieurs avantages sur l'état de santé et le mode de vie. Alors que la lumière intérieure est généralement sous le contrôle total de l'occupant, l'éclairage extérieur l'est moins.

L'éclairage nocturne, tel que l'éclairage routier et des abords ou l'éclairage sur la propriété des voisins peuvent pénétrer dans les maisons où les gens dorment. **Certaines études indiquent que le seuil de perturbation de l'éclairage est assez faible.** Le rôle de la lumière artificielle nocturne parasite a été le sujet d'ateliers spécifiques de l'Institut national des sciences de la santé de l'environnement en 2006 et d'une résolution de l'American Medical Association. Étonnamment, la découverte de ce système circadien photosensible est tout récente, ce qui indique que notre compréhension des effets indésirables de la lumière nocturne parasite, et en particulier l'éclairage à forte composante bleue, ralentissent le développement et la mise en œuvre des technologies

de l'éclairage.

Dans une récente revue exhaustive, Stevens récapitule plus de 100 publications de recherches sur l'effet de la lumière nocturne (LAN - light At Night) sur la perturbation du rythme circadien humain, la production de mélatonine et le cancer du sein... Beaucoup de laboratoires et des études épidémiologiques prouvent que la production diminuée de mélatonine peut mener à une plus grande incidence sur le taux de croissance ou le nombre de cancer du sein.

En outre, une expérience scientifique montre que les gens vivant dans des environnements urbains éclairés souffrent d'une augmentation du taux de cancers du sein, alors qu'ils ne souffrent pas plus du cancer du poumon que la moyenne, qui lui n'est pas lié aux niveaux de mélatonine. Tous les facteurs potentiellement négatifs n'ont pas été exclus, et des recherches sérieuses concernant l'exposition accidentelle à l'éclairage extérieur, ainsi que les caractéristiques spectrales de la lumière par exemple, n'ont pas été publiées.

Toutefois, les effets de la lumière à forte composante bleue sur la production de mélatonine, et les effets de la mélatonine sur la croissance de cancer humain dans certaines expériences de laboratoire, sont indiscutables.

Stevens conclut: « L'impact de l'éclairage sur la vie ... commence seulement maintenant à être évalué. Parmi les nombreux effets potentiellement néfastes de la lumière nocturne (LAN) et la perturbation du rythme circadien sur la santé humaine, la plupart des preuves sont, à ce jour sur le cancer du sein.

Aucune étude ne peut prouver la cause et l'effet, comme aucun groupe d'études ne peut le faire sur un seul des facteurs cités ci-dessus. Cependant, pris ensemble, les données épidémiologiques et la science fondamentale peut conduire à une « preuve » de la causalité (c'est-à-dire à un consensus d'experts). Si c'est le cas, alors il y aurait une opportunité pour les architectes et les groupes de personnes intéressées par l'éclairage, en collaboration avec la communauté scientifique, de développer des nouvelles technologies d'éclairage qui prennent mieux en compte le système circadien à la fois la nuit et le jour, à l'intérieur des bâtiments. »

Tandis qu'une corrélation solide entre l'éclairage extérieur et le cancer n'a pas encore été établie, mais si cela s'avère vrai, il est clair que la composante bleue de la lumière serait un facteur de risque plus élevé.

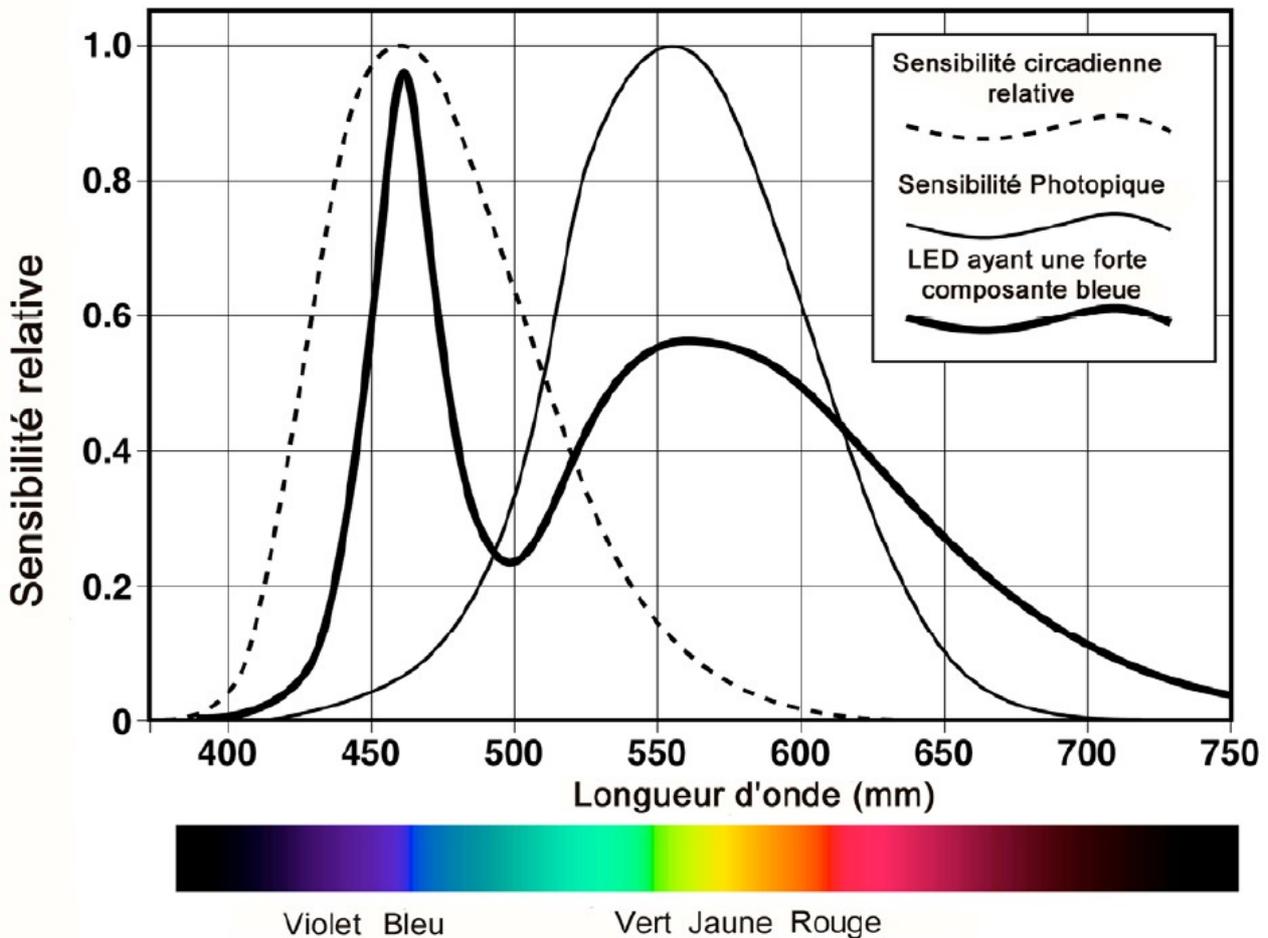


Figure 3. Courbes de sensibilité photopiques et circadiennes humaines présentées avec le spectre à forte composante bleue typique d'une source lumineuse à LED.

11. Effets environnementaux

L'éclairage artificiel est à l'origine prévu pour servir uniquement les besoins de l'homme, mais une fois installé à l'extérieur, il rayonne librement dans l'environnement où il peut avoir des conséquences imprévues sur la faune.

On estime que la majorité de la faune sur la planète est nocturne. Cette préférence pour l'activité nocturne peut provenir de la fuite des prédateurs, de l'aversion de la chaleur, des avantages pour la recherche de nourriture, ou d'autres facteurs.

L'altération du niveau de luminosité ambiante nocturne peut entraîner comme conséquence un habitat peu favorable, inhospitalier et devenant ainsi inutilisable. **La lumière artificielle dans l'environnement peut donc être considérée comme une atteinte chronique de l'habitat.** «La pollution lumineuse a des effets tangibles sur les comportements et l'écologie de populations d'organismes dans leur milieu naturel... À partir de changements d'aspect, de désorientation ou de détournement, d'attraction ou de répulsion par la modification de l'environnement lumineux, qui à leurs tours peuvent

affecter la recherche de nourriture, la reproduction, les migrations, et la communication ».

Les naturalistes, dès 1883, ont remarqué l'impact que la lumière artificielle peut avoir sur la faune, et à partir de 1935, ils se sont rendu compte que la couleur de la lumière pouvait jouer un rôle. La relation entre la lumière artificielle et la Faune n'a pas reçu le niveau d'étude nécessaire pour donner des réponses définitives sur les questions concernant les seuils d'éclairement qui causent une perturbation ou concernant les portions du spectre qui affectent les comportements des espèces. La plupart des recherches ne porte que sur la présence ou non de lumière et n'abordent pas la relation entre la répartition spectrale énergétique et la fonction biologique.

Néanmoins, les résultats ne confirment pas le fait comme quoi les caractéristiques spectrales de l'éclairage extérieur peuvent être modifiées sans conséquence écologique. Il y a peu d'exemples dans lesquels l'augmentation de l'émission lumineuse bleue peut être interprétée comme étant meilleure pour la faune que l'éclairage à forte composante jaune...

Il y a plusieurs exemples où une lumière de courte longueur d'onde est mise en lien aux problèmes écologiques, bien que quelques études impliquent également d'autres parties du spectre. Cependant, une plus grande diffusion de la lumière bleue dans l'atmosphère, une sensibilité de nombreux systèmes biologiques envers la lumière bleue, et une pénétration plus profonde de la lumière bleue dans les environnements aquatiques signifient qu'une utilisation massive des sources lumineuses à forte composante bleue est susceptible de produire des conséquences plus importantes sur l'environnement.

12. Exemple de perturbation de la vie sauvage.

Un ensemble fiable de travaux scientifique montre la désorientation des tortues de mer par l'éclairage artificiel. Les nouveau-nés sont facilement attirés par les lumières artificielles au lieu de la luminance naturelle de l'océan et ainsi empêche leur déplacement de la plage vers l'eau, et leur taux de survie diminue. **La réaction de photo-orientation des tortues Caouannes montre 10 fois plus d'écart entre une lumière à 450 nm et une lumière à 600 nm.** S'ajoute à cela quatre autres espèces de tortues marines de l'Atlantique montrant une réaction et une désorientation spectrale similaires (Witherington & Martin, 2000). En outre, le niveau de sensibilité est tel que la luminosité du ciel lointain, et pas seulement une source de lumière proche, peut produire une réaction (Salmon, 2006). On peut noter que les six espèces de tortues marines de l'Atlantique sont listées comme étant menacées ou en voie de disparition en vertu de la loi sur les espèces en péril et nichant dans le Golfe du Mexique et la côte atlantique, jusqu'à Cape Cod, loin au nord. (Plotkin, 1995).

Les sources de lumière ayant une forte composante bleue et ultraviolette sont particulièrement attractives pour les insectes (Frank, 1988), de même que les sources à incandescence, à large spectre, généralement non considérées comme à forte composante bleue, sont généralement connues pour attirer les insectes, comme les éclairages de porte d'entrées de nos maisons.

Il y a très peu d'études publiées abordant le pouvoir d'attraction de l'ultraviolet par rapport à la lumière bleue, même si quelques études inédites montrent que si l'ultraviolet attire beaucoup plus que la lumière bleue, la lumière bleue est plus attractive que la lumière jaune. Les insectes dans les zones éclairées artificiellement sont souvent capturés

par la fixation photo-tactique sur les lampadaires, mais les lampadaires peuvent aussi attirer les insectes des habitats naturels vers les zones éclairées, ou faire obstacle à la migration des insectes se déplaçant dans une zone (Eisenbeis, 2006).

Ainsi, **la distance à laquelle un lampadaire donné peut affecter les insectes, peut être très grande**. Les lampes sans émission importante de courte longueur d'onde, les ampoules incandescentes ou encore les lampes anti-insectes¹³ simplement peintes en jaune aux lampes à sodium basse pression, réduisent considérablement ou éliminent cette réaction photo-tactique.

La plupart des espèces de chauve-souris sont des insectivores et sont depuis longtemps observées la nuit autour des lampadaires pour s'alimenter. Ce phénomène a comme conséquence un changement écologique complexe qui est potentiellement dangereux, les luminaires concentrent leur source de nourriture en dehors de leur habitat naturel, et peuvent entraîner des vols plus longs vers les endroits où elles s'alimentent, changer leur régime (alimentaire), ainsi que l'équilibre compétitif entre les espèces de chiroptères (Rydell, 2006).

13. Perturbation du rythme circadien de la faune

La photopériode est l'un des caractéristiques dominantes dans le règne animal : la réaction d'un animal est généralement déclenchée par la durée de la nuit en opposition à celle du jour. **La lumière est un agent efficace et est biologiquement active**.

Comme chez l'homme, l'horloge circadienne contrôle un nombre important de fonctions endocriniennes complexes quotidiennes et saisonnières. Cette dernière déclenche les migrations, la reproduction et les comportements de recherche de nourriture. Le fait que la lumière a forte composante bleue est tendance à synchroniser la fonction circadienne est commune chez les mammifères, et il y a des preuves de ses effets sur les amphibiens ainsi que sur le plancton.

14. Luminosité du Ciel, astronomie, et paysage nocturne naturel

Sur les sites à proximité de sources lumineuses, comme à l'intérieur et à proximité des zones urbaines, l'augmentation de la diffusion provoquée par les sources de lumière à forte composante bleue conduit à une augmentation de la luminosité du ciel (voir **figure 4**).

Les sources les plus bleues produisent plus de 15% à 20% de la brillance du ciel auxquelles on ajoute toutes les autres lumières ayant une longueur d'onde différentes tel que les Sodium haute Pression (NaHP) ou les Sodium Basse Pression (NaBP). Cet effet rend beaucoup plus difficile l'observation à l'œil nu, l'évolution vers une vision adaptée à l'obscurité augmente la sensibilité aux courtes longueurs d'onde.

Dans une zone relativement sombre (suburbaine ou rurale), où les yeux peuvent devenir complètement ou presque complètement adaptés à l'obscurité (vision scotopique), la luminosité du ciel produite par l'éclairage artificiel peut apparaître 3 à 5 fois plus lumineuse à cause des sources lumineuses à forte composante bleue par rapport aux sources NaHP

¹³ *La fixation photo-tactique est une action de fixer une source de lumière et de se maintenir dans sa direction. Les lampes anti-insectes sont désignées comme des « Bug light »*

et jusqu'à 15 fois plus que les NaBP.

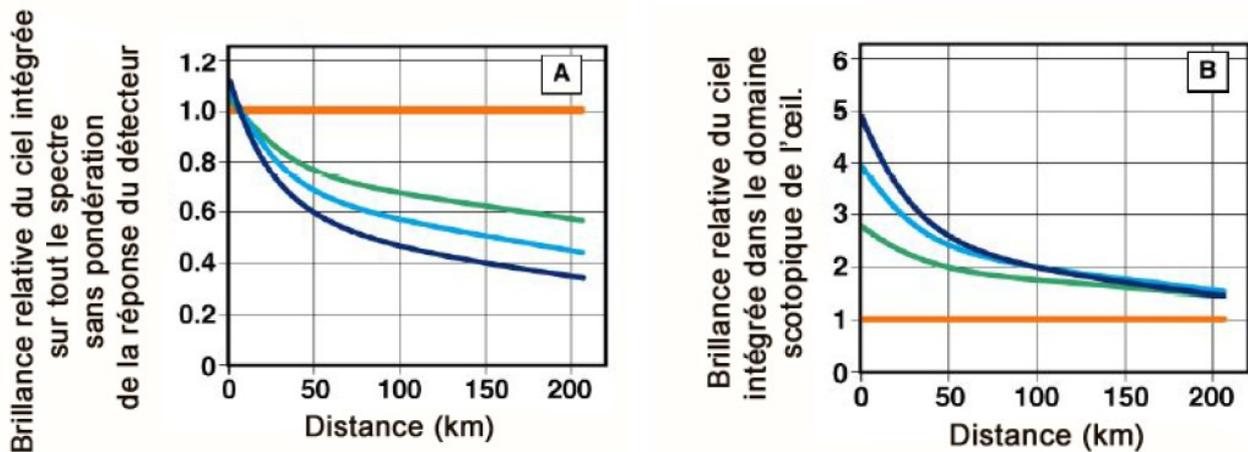


Figure 4 a) Brilliance relative intégrée sur tout le spectre et b) Brilliance relative du ciel en visuel (scotopique) en fonction de la distance pour un rayonnement des sources lumineuses avec un flux de même niveau de longueur d'onde de 480nm (bleu), 500nm (cyan) et 520nm (vert), comparativement au SHP (jaune).

Dans les endroits éloignées des sources lumineuses, une augmentation de l'absorption et de la diffusion d'émission de plus courte de longueur d'onde implique que la luminosité du ciel intégrée sur tout le spectre de longueur d'onde à cause des sources à forte composante bleue soit inférieure à celle des NaHP (voir la **figure 4a**). Néanmoins, pour l'œil adapté à l'obscurité, **la luminosité produite par des sources à forte composante bleue reste supérieure à celle des NaHP pour les longues distances**, au moins 200 km dans les atmosphères typiques¹⁴ (voir la **figure 4b**).

Il est important de reconnaître que, bien que la luminosité du ciel produite par des sources de lumière à forte composante bleue diminue plus rapidement avec la distance que celle produite par les NaHP, la lumière à forte composante bleue ajoute un éclairage parasite pour le ciel dans une portion du spectre qui pour la plupart des sites souffre relativement peu du halo artificiel dû aux pratiques actuelles de l'éclairage... Les NaHP, qui constituent toujours la technologie dominante dans le secteur de l'éclairage dans la plupart des collectivités, contribuent très peu à une émission de lumière dans la partie bleue du spectre du ciel nocturne. Dans nos collectivités qui utilisent le sodium à basse pression (NaBP), la partie bleue du spectre de ciel nocturne est encore moins affectée.

Du point de vue de la science astronomique, **l'effet de ce supplément de flux de courte longueur d'onde est aggravé parce que le ciel naturel est plus noir pour longueurs d'onde plus bleues** (le ciel à 440 nanomètre n'a approximativement que 45% de la luminosité que celui à 550 nanomètre). L'effet prévisible est que les sites d'observation et de recherche astronomiques seront gênés à un degré plus élevé pour une même quantité de lumière à forte composante bleue par rapport à celle produite par des NaHP dû à un effet inégal

¹⁴ L'impact des sources à forte composante bleue reste aussi supérieure sur de grandes distances à celle des SHP dans des bandes photométriques autre que celle du visible appelée V comme celle centré dans le bleu appelée bande B en astronomie.

sur le contraste.

Par rapport aux impacts sur l'observation astronomique scientifique, qui est affecté par le rayonnement artificiel accru dans la partie supérieure du ciel (d'environ 20° au-dessus de l'horizon jusqu'au zénith), c'est le paysage nocturne tel qu'il est vu par les observateurs humains qui est fortement influencé par l'interaction de la sensibilité spectrale de la vision humaine avec le contenu spectral des sources lumineuses, et l'aspect du halo lumineux au-dessus des villes. **Pour l'œil humain adapté à l'obscurité, le soi-disant « avantage scotopique » des sources lumineuses à forte composante bleue devient dans ce cas-ci un inconvénient total.**

Par exemple, pour une quantité donnée de lumière artificielle (mesurée en unités de flux radiométrique, et non en lumens se restreignant au flux lumineux uniquement visible par l'œil en condition photopique) diffusée en direction du ciel et avec un rapport de S/P (Scotopique/Photopique) de 3 apparaîtra jusqu'à 5 fois plus lumineux que pour la même quantité de lumière produite par une lampe NaHP avec un rapport de S/P de 0,6 (par exemple : $3,0/0,6 = 5$). Comme les halos lumineux des zones urbaines empiètent sur de nombreux secteurs ruraux et naturels, y compris les parcs nationaux (Duriscoe et al. 2007), une plus grande utilisation des sources lumineuses à forte composante bleue augmenteront ces impacts à des distances de 100 kilomètres, voire plus (Luginbuhl et al. 2010).

Les impacts culturels résultant de la perte d'une nuit étoilée naturelle sont difficiles à quantifier. Pourtant, ces impacts touchent une proportion beaucoup plus importante de la population qu'on ne le pense (généralement), lorsque l'on parle de la valeur du ciel nocturne (voir par exemple Moore et al. 2010).

15. Conclusion

Bien qu'il y ait un intérêt significatif pour l'utilisation d'un éclairage avec plus de longueurs d'onde bleues, les relations complexes entre la performance visuelle et la distribution spectrale des sources lumineuses ne sont pas bien comprises, en particulier au niveau de la luminance mésopique.

Dans la gamme des longueurs d'onde bleues, il existe de multiples actions opposées qui peuvent diminuer ou annuler les avantages de la stimulation scotopique, sans oublier l'éblouissement, une adaptation à l'obscurité retardée, la constriction de la pupille, et les facteurs liés au vieillissement. En outre le seuil de luminance est d'une importance particulière, où de tels avantages s'accroissent.

La plupart des niveaux lumineux extérieurs se situent dans la gamme mésopique haute (beaucoup plus proche du domaine photopique que scotopique). Les avantages de la lumière à forte composante bleue se trouvant aux bas niveaux mésopiques ou scotopiques, ils ne devraient pas être appliqués de façon incorrecte pour des niveaux de forte luminosité.

Avec seulement une familiarisation sommaire aux avantages de l'éclairage à forte composante bleue, on pourrait supposer que les niveaux autorisés potentiellement plus bas d'éclairage permettraient de réduire les incidences sur l'environnement au même niveau que celle des luminances photopiques.

Cette hypothèse n'est pas correcte. Il y a beaucoup plus d'effets délétères pour les humains, la faune et les richesses astronomiques liées à la lumière à forte composante bleue.

Tout d'abord, l'atmosphère diffuse les longueurs d'onde plus courtes à un niveau beaucoup plus élevé que celle de plus grandes longueurs d'onde, et les yeux adaptés à l'obscurité et observant un ciel pollué par la luminosité artificielle du ciel sont plus sensibles à la lumière à forte composante bleue. Par rapport aux NaHP, les sources lumineuses riches en bleu diffusent 1,1 à 1,2 fois plus ; pour l'œil adapté à l'obscurité cette lumière apparaîtra alors 3 à 5 fois plus lumineuse quand elle est observée de près. Ainsi, la lumière à forte composante bleue aggraverait considérablement la luminosité du ciel (halo) à proximité de la source lumineuse et maintiendrait de grands impacts même à des distances très grandes.

Deuxièmement, du point de vue de l'observation astronomique dans les observatoires isolés, l'émission de sources d'éclairage dans les courtes longueurs d'onde à forte composante bleue augmentera la luminosité du ciel dans la partie bleue du spectre qui est naturellement relativement sombre et non polluée (par les lampes NaHP et NaBP). Le résultat est une **diminution du contraste et une dégradation de l'efficacité des équipements astronomiques** pour ce champ de longueur d'ondes.

L'état actuel de nos connaissances concernant les effets de la lumière nocturne sur la santé, et en particulier la lumière nocturne à forte composante bleue, ne permet aucune conclusion définitive. Pourtant, un lien évident entre émissions de lumière de courte longueur d'onde et la réponse des photorécepteurs sensible au bleu impliqués dans le système circadien humain, ainsi que la diminution de la production de mélatonine par l'émission dans les courtes longueurs d'onde, indique au moins que l'utilisation généralisée de sources lumineuses nocturnes à forte composante bleue doit être considérée avec prudence. Il est urgent de poursuivre les recherches dans ce domaine, en raison des effets potentiellement graves suggérés par beaucoup d'études.

La photobiologie¹⁵ indique que **la lumière nocturne à forte composante bleue est plus susceptible de modifier le rythme circadien** et la photopériode dans le règne animal. Grâce à ce tout nouveau champ d'étude, les preuves sont largement disséminées à travers le règne animal. Les lumières à forte composante jaune comme les NaHP, ou même avec une lumière jaune monochromatique, comme le NaBP, sont écologiquement préférables dans de nombreux cas, mais il y a de ce pendant des exceptions. Toutefois, le bilan des preuves indique que les impacts de la lumière à forte composante bleue sur la faune sont beaucoup plus probables que celle à forte composante jaune. Les disparités écologiques provoquées par la lumière à forte composante bleue et celles qui ne contiennent pas cette couleur peuvent être maintes fois plus importantes pour certaines espèces se trouvant dans une situation préoccupante.

La pollution lumineuse et d'autres effets négatifs de l'éclairage extérieur atteignent de grandes distances. Les villes et les routes éclairées sont en étroite interaction avec le milieu naturel, ainsi que certains sites qui ont une valeur reconnue par la société comme ayant un ciel étoilé sobre et naturel. **La mutation vers une lumière à forte composante bleue, en particulier à la place des NaHP, augmente sensiblement les effets néfastes de l'éclairage extérieur.**

15 *La photobiologie est l'étude de l'influence de la lumière sur les systèmes biologiques*

Dans les régions sauvages, rurales, et même suburbaine, la fonction visuelle est purement scotopique. Ainsi, le rapport S/P va à l'encontre de l'observateur qui regarde le ciel nocturne - plus la lumière a un contenu scotopique élevé, plus la pollution lumineuse est perçue. Même à des distances allant jusqu'à 200 km au moins, là où la lumière bleue est idéalement dispersée, le préjudice envers l'observation des étoiles est encore plus grand avec les lampes à forte composante bleue qu'avec des sources NaHP, en particulier dans des ciels dénués de toute pollution lumineuse.

La tendance actuelle vers un éclairage extérieur blanc à forte composante bleue se traduira par une forte augmentation des flux de rayonnement émis en dessous de 500 nm. **Il en résultera une suite d'effets néfastes connus et probables sur les écosystèmes, la jouissance du ciel nocturne, la recherche astronomique, et probablement la santé humaine.** Si ces conséquences préjudiciables doivent être sérieusement prises en considération par les concepteurs et les fabricants d'éclairages, ainsi que les fonctionnaires, alors les paramètres qui décrivent au mieux les conséquences des courtes longueurs d'onde du spectre des lampes doivent être développés.

Par ailleurs, les lampes peuvent être sélectionnées ou filtrées pour limiter les émissions en dessous de 500 nm. Une telle lumière montrerait en général seulement une tonalité jaunecclair et permettrait toujours une vision scotopique tout en diminuant les effets nuisibles.