

LES CAHIERS DE BIODIV'2050 :
COMPRENDRE

Eclairage
du 21^{ème} siècle
et biodiversité

Pour une meilleure prise
en compte des externalités
de l'éclairage extérieur sur
notre environnement

N°6 - Juillet 2015

MISSION
ÉCONOMIE
DE LA **BIODIVERSITÉ**



Association
Nationale pour
la Protection
du Ciel et de
l'Environnement
Nocturnes

cdc
biodiversité



EDITO



La Mission Economie de la Biodiversité de la Caisse des Dépôts a un objectif : réconcilier développement économique et préservation de la biodiversité. Vaste programme, mais absolue nécessité dans cette période de forte menace sur la biodiversité, et donc sur les services écosystémiques qui sont à la base de nos sociétés humaines.

Atteindre cet objectif demande d'étudier des domaines divers. La MEB s'y attelle en suivant des principes forts : innovation, partenariat, pluridisciplinarité, solidité scientifique, et intérêt général. Cette étude, menée en partenariat avec l'ANPCEN, en est un exemple. Ici, l'enjeu est de concilier les besoins d'éclairage avec le respect de la vie sauvage nocturne, et d'identifier les leviers économiques permettant de transformer les systèmes d'éclairage pour rendre possible cette conciliation.

L'innovation est présente ici dans le choix du sujet développé. Si des recherches sur des sujets connexes ont déjà fait l'objet de quelques études, l'analyse des liens entre éclairage artificiel et biodiversité n'est pas un sujet de recherche et développement flagrant. Et ce, que l'on soit spécialiste de l'un ou de l'autre des deux sujets. L'ANPCEN fait partie de ces experts qui ont compris tout l'enjeu d'un tel sujet.

Le partenariat avec cette association de référence et son réseau d'experts a donc été évident pour la MEB. Nous cherchons constamment à travailler avec des partenaires aux connaissances reconnues et aux propositions allant dans le sens de l'intérêt général. L'ANPCEN est de ceux-là, et les résultats de cette étude nous semblent montrer toute la richesse de ces partenariats.

La pluridisciplinarité est un besoin, lorsqu'il s'agit d'aborder des thèmes tels que celui-ci. Nous le verrons ici, étudier les liens entre éclairage artificiel et biodiversité a nécessité des connaissances techniques dans divers domaines (électricité, vision, conception et entretien des systèmes d'éclairage) en plus de connaissances dans les domaines de la physiologie ou de l'écologie comportementale par exemple. Sans compter les aspects juridiques ou de santé humaine.

La solidité scientifique des données et résultats est une exigence, tant pour l'ANPCEN que la MEB. Et d'autant plus dans un domaine comme celui-ci, où les connaissances scientifiques sont encore trop peu nombreuses. Pour proposer des outils innovants qui permettent, une fois mis en œuvre, de préserver réellement la biodiversité nous cherchons constamment à disposer de la meilleure connaissance possible sur les domaines scientifiques abordés.

Enfin, l'intérêt général guide notre action, de même que celle de l'ANPCEN. Produire des résultats qui y contribuent nécessite de les rendre compréhensibles et accessibles par le plus grand nombre, mais aussi de proposer des outils utiles aux structures concernées. Ici, cela nous a conduits à explorer les moyens dont disposent aujourd'hui les acteurs publics, collectivités en premier lieu, pour intégrer les enjeux de biodiversité à leur système d'éclairage. Les pistes identifiées peuvent aussi s'avérer utiles pour d'autres acteurs. Dans tous les cas, les propositions que nous faisons ont été pensées comme techniquement réalistes et répondant aux besoins des acteurs concernés.

LAURENT PIERMONT
Directeur de la
Mission Economie de la Biodiversité

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Laurent Piermont'.

EDITO


© Regis Fialaire

Pourquoi vouloir faire de nos nuits, nos jours ?

La lumière artificielle nocturne, émise en quantité toujours croissante depuis des décennies, est un service conçu par les humains pour eux-mêmes. A ce jour, il se soucie peu de partager les paysages nocturnes et ce temps si original de la nuit, entre les activités humaines et les nécessités de la vie de

la biodiversité avec toutes les fonctions biologiques et écologiques qui lui sont associées, nécessaires en retour aux sociétés. Une réflexion quant aux finalités, effets et limites de la lumière est nécessaire. Pourquoi vouloir faire de la nuit, le jour ? Ce surgissement de nos lumières puissantes, parfois constantes, dans une alchimie aussi riche que la nuit est extrêmement singulier et bouleverse l'alternance du jour et de la nuit sur laquelle repose, depuis des milliards d'années, la réponse du vivant et son adaptation aux cycles naturels.

Ajout après ajout de points lumineux partout, chacun apparemment anodin, ils ont augmenté de 89 % depuis 1992. Si la durée d'éclairage ou les animations lumineuses se multiplient, les effets possibles sur le vivant restent absents du questionnement, donc in fine des choix effectués. Malgré le besoin d'actions que supposent l'état actuel de nombre d'écosystèmes, malgré les engagements internationaux et nationaux pris pour la biodiversité, malgré les objectifs de prévention et suppression des nuisances lumineuses inscrits dans la loi, malgré les alertes de la société civile et les données scientifiques existantes, les outils de réponse aux interactions entre lumière artificielle et biodiversité manquent pour prévenir les effets néfastes à la vie. De plus, les textes et outils dédiés à la biodiversité, à l'énergie ou à la santé oublient régulièrement le besoin d'une nouvelle conception et gestion de toutes nos lumières cumulées.

De là, naît tout l'enthousiasme de l'ANPCEN pour cette publication avec la Mission Economie de la Biodiversité, du groupe Caisse des Dépôts dédié aux réponses par l'Etat, les collectivités ou les acteurs économiques, dans une vision d'intérêt général et de recherche de durabilité. La volonté pionnière de l'ANPCEN de créer des outils et réponses innovantes, parfois de simple bon sens comme celle d'intégrer l'observation du vivant et des paysages nocturnes, la limite des ressources et la capacité d'adaptation du vivant face à des bouleversements massifs et rapides. Elle rejoint la vocation de la MEB pour l'exploration de nouvelles relations constructives entre économie et biodiversité.

Nombre d'études sont rassemblées comme contribution. Elles montrent les effets de la lumière sur le vivant et la combinaison de cette pression à d'autres. Il ne s'agit plus d'un sujet émergent. Ce sont surtout les réponses concrètes d'acteurs publics et privés qui restent absentes. Aussi les outils contractuels analysés ici peuvent guider l'Etat, les collectivités et acteurs territoriaux vers ce qui permettrait d'insérer la prise en compte des enjeux du vivant dans les choix et les usages de l'éclairage extérieur, pour mieux concilier objectifs énergétiques et éco-systémiques, sociétaux et économiques. Excellons désormais dans la reconnaissance de l'intérêt vital des sociétés à la coexistence humains-environnement autant que dans les techniques pour le rendement lumineux. Notre pari est celui d'une lumière d'avenir conçue de manière moins standardisée pour des besoins pluriels et mieux partagés au cœur de la nuit. C'est le pari d'une lumière du XXIème siècle qui, plus qu'une innovation technologique seule, résultera d'une vision plus globale et cohérente et prendra en compte ses propres externalités pour les résoudre. L'ingénierie construite sur le dépassement de limites physiques et naturelles, l'augmentation continue de la consommation de matières ou l'obsolescence programmée est probablement déjà dépassée ; celle de demain réside dans de nouveaux usages et services, elle s'inspirera des stratégies ingénieuses et cycliques du vivant, pleinement d'actualité, pour voir, se déplacer, échanger, et, pourquoi pas, se reposer, la nuit.

ANNE-MARIE DUCROUX
Présidente de l'ANPCEN



SOMMAIRE

1. Eclairage et Biodiversité : le cadre de l'étude MEB-ANPCEN 7

Enjeux de la biodiversité	7
L'éclairage extérieur : définitions, évolutions et enjeux	9

2. La lumière et le vivant 23

La lumière, facteur majeur de la synchronisation biologique	23
Une perception visuelle de la lumière différente selon les espèces	25

3. Eclairage artificiel et espèces : état de connaissances 29

Les poissons	29
Les crustacés	34
Les insectes	34
Les amphibiens	35
Les reptiles	36
Les oiseaux	37
Les mammifères	37
Synthèse MEB-ANPCEN des effets perturbateurs de l'éclairage sur la biodiversité	39

4. Des préconisations MEB-ANPCEN pour un éclairage extérieur moins perturbant pour la biodiversité 41

Les recommandations générales MEB-ANPCEN	41
Lampes et distributions spectrales	43
Des pistes de réflexions visant à encourager la prise en compte intégrée des externalités de l'éclairage	45

5. Les contrats et les aides mobilisables 49

Les contrats mobilisables pour la rénovation des réseaux d'éclairage public	49
Les aides et dispositifs publics	58
Les pistes pour une prise en compte globale des externalités de l'éclairage	63

CONCLUSION 65

GLOSSAIRE 67

RÉFÉRENCES 68

DIRECTEURS DE LA PUBLICATION :

LAURENT PIERMONT et ANNE-MARIE DUCROUX

REDACTEUR EN CHEF : PHILIPPE THIÉVENT

ETUDE MENEÉ SOUS LA COORDINATION DE : GUILLAUME QUÉMARD avec l'appui de VINCENT HULIN, NICOLAS BESSOLAZ, ANNE-MARIE DUCROUX.

REMERCIEMENTS : JACK FALCON (CNRS), CLAUDE GRONFIER (INSERM), DAVID HICKS (INSERM), ELODIE MAGNANOU (CNRS), JEAN-PHILIPPE SIBLET (MNHN), CATHERINE WEIL (Caisse des Dépôts), JOSEPHINE JEANCLIOS.

AGENCE CONCEPTO, AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE (ADEME), CONSERVATOIRE NATIONAL DU SAUMON SAUVAGE (CNSS), EXTERIMMO, FEDERATION NATIONALE POUR LA PÊCHE EN FRANCE (FNPP), SEM ÉNERGIES POSIT'IF, SYNDICAT DÉPARTEMENTAL D'ÉNERGIE 35 (SDE35).

EDITION : MISSION ÉCONOMIE DE LA BIODIVERSITÉ

CRÉATION GRAPHIQUE : JOSEPH ISIRDI - www.lisajoseph.fr

CONTACT : meb@cdc-biodiversite.fr

PHOTO COUVERTURE : © TAWATCHAI PRAKOBKIT

INTRODUCTION

Le 31 mars 1880, Wabash (320 habitants alors) dans l'Indiana aux Etats-Unis est devenue la première bourgade éclairée à l'électricité. Cette étape marque une révolution importante dans le développement de nos sociétés et la relation que nous entretenons avec notre environnement. Ainsi, jusqu'au milieu du XIX^e siècle, la biodiversité avait été peu exposée à des sources d'éclairage artificiel.

Les fonctions dédiées à l'éclairage ont depuis considérablement évolué.

Du Moyen Age au XVIII^e siècle, il répondait basiquement à des besoins humains de déplacements nocturnes et de sécurité. A partir des années 30, l'électrification des espaces s'est généralisée, augmentant le confort. Depuis les années 80, **l'éclairage a dépassé ces fonctions de service urbain pour revêtir une forme d'expression politique, sociale ou de participation au spectacle par la mise en lumière de tout élément de l'environnement : monuments, infrastructures, et même nature (arbres, parcs et jardins, falaises naturelles, etc.), parfois toute la nuit, tous les jours de l'année** (Etude INSV-ANPCEN – MEDDE, 2012).

L'urbanisation croissante s'est accompagnée d'un déploiement massif de l'éclairage extérieur. Petit à petit, la perception de l'éclairage s'est installée comme celle d'un progrès par nature, sans analyse des externalités conjointes à son expansion considérable. Or, la durée d'éclairement n'a cessé de croître, la nature des éclairages utilisés a changé, et les sources lumineuses éclairent souvent bien au-delà des surfaces utiles... La déperdition lumineuse est à l'origine d'énormes halos lumineux au-dessus des espaces urbanisés, d'une pollution lumineuse visible à plusieurs kilomètres, ainsi que d'un éclairage accru des milieux environnants, qu'ils soient urbanisés ou naturels. En se basant sur des données de 1997, Cinzano et al. (2001) montrent que 99 % de la population de l'Union Européenne et des Etats-Unis vivent dans des zones dans lesquelles, la nuit le ciel est pollué par la lumière artificielle. En France, on ne trouve actuellement plus un seul endroit où la luminance artificielle du ciel est inférieure à 10 % de sa luminance naturelle. Le plus souvent, elle est supérieure à 3 fois la luminance naturelle à proximité des villes et 10 fois supérieure dans les cœurs urbains (ANPCEN, 2010).

Ainsi, la lumière artificielle ronge de plus en plus les zones d'obscurité naturelle dans lesquelles les espèces ont évolué. Il est utile de rappeler qu'environ **30 % des vertébrés et plus de 60 % des invertébrés sont nocturnes** (Hölker et al., 2010). La scotophase, c'est-à-dire la période d'obscurité d'un cycle d'alternance jour et nuit sur une période de 24h, se réduit donc pour nombre d'espèces, impactant ainsi leurs rythmes biologiques et leurs comportements. Si cette disparition de la nuit est perceptible par tout un chacun, il est moins aisé d'appréhender les effets de la lumière artificielle (par l'intensité, la direction et le contenu spectral de chaque source lumineuse) sur les écosystèmes, leur fonctionnement et les différents éléments qui les composent, et en particulier sur les espèces. En effet, chaque espèce a des capacités visuelles différentes, souvent très éloignées de celles des humains, qui la rendent plus ou moins sensible aux différentes longueurs d'ondes. L'évolution technologique vers des lampes moins énergivores et la volonté de toujours accroître la perception visuelle humaine la nuit se sont accompagnées d'une évolution des émissions spectrales et un niveau d'éclairement plus important. Or, ces évolutions anthropocentrées ont été conçues sans prendre en compte les besoins de la biodiversité qui nous entoure.

Cet état de fait doit être analysé au regard de l'objectif public de « prévention, limitation et suppression des nuisances lumineuses » figurant dans la loi française, et au regard des objectifs publics internationaux, européens et français pour lesquels des engagements ont été pris par la France, afin de prévenir, réduire et stopper la perte de biodiversité. Enfin, l'enjeu est à situer dans la responsabilité par chacun d'y contribuer, exprimée par la Constitution⁽¹⁾.

Les spécificités françaises confèrent de plus à la France une responsabilité particulière à l'égard de la biodiversité : « En Europe continentale, la France se situe à un carrefour d'influences biogéographiques et couvre 4 des 11 régions biogéographiques (atlantique, alpine, continentale et méditerranéenne). La France est ainsi située dans 5 des 34 points chauds de la biodiversité terrestre mondiale reconnus par le WWF [World Wild Fund] et l'UICN [Union Internationale pour la Conservation de la Nature] et 4 de ces points chauds sont localisés en outre-mer. L'espace maritime français couvre plus de 11 millions de kilomètres carrés : c'est le deuxième plus grand au monde. Tous ces éléments confèrent au pays une forte responsabilité en matière de biodiversité ». (Stratégie nationale de la biodiversité 2011-2020)

On sait aujourd'hui que les pressions sont multiples : fragmentation, altération et destruction des milieux naturels liées, en particulier, à l'urbanisation croissante, à la surexploitation d'espèces sauvages, à l'introduction d'espèces exotiques envahissantes, à la pollution de l'air, des sols, des cours d'eaux et des océans, et aux changements climatiques. L'augmentation de ces pressions est très fortement liée aux évolutions démographiques et à des modes de production et de consommation. Eclairage et sur-éclairage nocturnes concourent à cette combinaison de pressions sur la biodiversité.

Dès les années 1970, aux Etats-Unis des astronomes ont commencé à attirer l'attention des pouvoirs publics sur ce problème. En France, depuis les années 1990, des voix s'élèvent, notamment dans le milieu associatif, face à l'augmentation continue de la quantité de lumière émise la nuit. En 1995, un congrès réunissant des associations d'astronomes s'est tenu à Rodez. A l'issue de ce congrès, le Comité national pour la protection du ciel nocturne (CNPCN) voit le jour. En 1998, l'Association nationale pour la protection du ciel nocturne (ANPCN) est créée suite au deuxième congrès de Rodez. Le nom de l'association évolue en 2007 pour devenir l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (ANPCEN). Ces évolutions reflètent le souhait d'une prise en compte plus globale des impacts, notamment, des enjeux environnementaux de la pollution et des nuisances lumineuses.

Les activités humaines et donc l'urbanisation se sont historiquement concentrées à proximité des cours d'eau et sur les zones côtières, exposant leur biodiversité à une forte pollution lumineuse, comme le montrent plusieurs études (Cinzano et al, 2001; Kummu et al, 2011). Les linéaires d'eau douce sont également éclairés plus vivement que les autres espaces naturels situés dans la même zone (Perkin et al, 2013). Une étude menée aux Etats-Unis montre que les lacs périurbains sont 5 à 50 fois plus exposés à la lumière artificielle que les lacs éloignés des villes (Moore et Kohler, 2002, cité dans Febbraro et Zufferey, 2005). Cette lumière permanente, qui peut avoir une luminosité équivalente à une nuit de pleine lune, voire davantage, a une influence sur le comportement des espèces qui vivent dans ces milieux, et ce jusqu'à environ trois mètres de profondeur (Moore et Kohler, 2002). Les rivières et canaux présents autour de Berlin sont cinq fois plus éclairés que les forêts et 1,4 fois plus que les prairies

(Kuechly et al, 2012). Pourtant, bien que la question de l'impact de l'éclairage sur la biodiversité ait fait l'objet de recherches ces dernières années, celles-ci se sont principalement concentrées sur les mammifères, les oiseaux et les insectes.

La Mission Economie de la Biodiversité (MEB) de la Caisse des Dépôts et l'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes (ANPCEN) ont ainsi décidé d'unir leurs compétences et expertises afin de documenter cette question, notamment en identifiant et synthétisant des connaissances scientifiques concernant l'impact de l'éclairage sur la biodiversité des écosystèmes terrestres et aquatiques. Le travail de synthèse bibliographique, consacré à l'impact de l'éclairage sur la biodiversité dans son ensemble, s'est cependant davantage concentré sur les espèces des écosystèmes aquatiques afin d'apporter une meilleure vision des connaissances portant sur ces milieux, concentrant de nombreux enjeux de préservation de la biodiversité et soumis à de fortes pressions.

Ce nouveau numéro des Cahiers de BIODIV'2050 vise également à proposer des recommandations de la MEB et de l'ANPCEN visant à réduire l'impact de l'éclairage extérieur sur la biodiversité. Il tente ainsi d'apporter des éléments d'information contractuels et financiers aux collectivités qui souhaiteraient s'engager dans une rénovation ou un remplacement de leur éclairage public qui tiendrait davantage compte des impacts sur la biodiversité sur l'ensemble des territoires, comme dans les espaces protégés et les continuités écologiques.

Les éléments présentés dans ce rapport sont issus d'articles scientifiques, de sources institutionnelles, complétées par la prise de contacts avec des scientifiques et personnes ressources, par la veille scientifique de l'ANPCEN et les données de la journée d'étude MEDDE-INSV-ANPCEN.

Présentation des partenaires :

La **Mission Economie de la Biodiversité (MEB)** est une initiative conjointe entre la Caisse des Dépôts et CDC Biodiversité, cette dernière ayant à charge sa mise en œuvre opérationnelle. Dans le cadre de ses activités, la Mission Economie de la Biodiversité s'attache à identifier, étudier et le cas échéant expérimenter des solutions innovantes de nature technique ou financière contribuant à la réussite des politiques publiques, nationales et internationales, relevant de la préservation ou de la restauration de la biodiversité. La Mission Economie de la Biodiversité travaille notamment sur des outils innovants de préservation ou visant à intégrer les enjeux de la biodiversité en ville. Ces travaux sont menés à partir de résultats de recherche et de synthèses de connaissance les plus actualisés possibles.

L'**Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes (ANPCEN)** est la seule association dont l'objet social est entièrement dédié aux enjeux pluriels de la qualité de la nuit et de l'environnement nocturnes et qui agit conjointement aux deux dimensions nationale et locale : plaidoyer, recommandations, dialogue, pédagogie vers les décideurs publics nationaux et les élus locaux, les acteurs et les citoyens, accompagnement, outils et productions originales, cartographie, centre de ressources... Elle privilégie une approche globale des impacts de la lumière artificielle nocturne et de ses coûts.

Avec ses adhérents et plus d'une centaine d'associations membres, l'ANPCEN mobilise plus de 6 000 personnes. Reconnue d'intérêt général, elle est agréée comme association nationale de protection de l'environnement.

⁽¹⁾ Loi constitutionnelle n°2005-205 du 1er mars 2005 <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000790249&dateTexte=>



Eclairage et
Biodiversité :
le cadre de l'étude
MEB-ANPCEN

1 Eclairage et Biodiversité : le cadre de l'étude MEB-ANPCEN

1.1 Enjeux de la biodiversité

La biodiversité est le résultat de millions d'années d'évolution. L'état des gènes, espèces et écosystèmes qui composent la biodiversité, et leurs interrelations, est non seulement une richesse contribuant à la régulation, l'adaptation et à la résilience des milieux, mais elle est aussi la base des activités des sociétés humaines, du bien être individuel, du lien social ou encore de la santé. Ainsi, les sociétés humaines tirent de la biodiversité des services indispensables à leur fonctionnement, le plus souvent sans qu'elles en soient pleinement conscientes.

Or, ce socle est de plus en plus menacé. En 2013, selon l'UICN, 11 000 espèces animales étaient menacées dans le monde⁽¹⁾. Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA) a montré en 2005 que 60 % des services fournis par les écosystèmes sont dégradés depuis 50 ans. Et l'essentiel des conclusions du MEA montre « que l'activité humaine réduit le capital naturel, exerçant des pressions si fortes sur l'environnement que nous ne pouvons plus supposer de la capacité des écosystèmes de la planète à soutenir les générations futures » (UNEP). La perte de cette diversité est donc susceptible de conséquences irréversibles.

Parmi les multiples pressions s'exerçant sur la biodiversité, les impacts de l'éclairage artificiel, dans les pays développés notamment, sont une problématique aussi généralisée que trop peu connue, alors que 30 % des vertébrés et plus de 60 % des invertébrés vivent partiellement ou totalement la nuit (Hölker et al., 2010) et que la biodiversité diurne a besoin d'une alternance de jour et de nuit. L'intrusion croissante depuis 50 ans de l'éclairage artificiel n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement naturel des écosystèmes, et donc *in fine* sur les sociétés humaines.

1.1.1 La biodiversité subit des pressions multiples

Le développement des activités humaines s'est accompagné de pressions multiples sur la biodiversité : fragmentation, altération et destruction des milieux naturels liées en particulier à l'urbanisation ou à l'artificialisation croissante, surexploitation d'espèces sauvages, introduction d'espèces exotiques envahissantes, pollutions de l'air,

des sols, des cours d'eaux et des océans, les changements climatiques. L'augmentation de ces pressions est très fortement liée aux évolutions démographiques et à des modes de production et de consommation.

Eclairage et sur-éclairage nocturnes des milieux concourent à cette combinaison de pressions sur la biodiversité. Mais cette pollution spécifique, ainsi que la fragmentation des milieux naturels qu'elle entraîne sont encore très peu prises en compte.

Les espaces artificialisés se sont accrus d'environ 3 % (+ 820 km²) entre 2000 et 2006 et occupaient plus de 5 % du territoire métropolitain en 2006 (Corine Land Cover, 2006). Ils recouvrent les zones urbanisées (tissu urbain continu ou discontinu), les zones industrielles et commerciales, les réseaux de transport, les mines, carrières, décharges et chantiers, ainsi que les espaces verts artificialisés (espaces verts urbains, équipements sportifs et de loisirs), par opposition aux espaces agricoles, aux forêts ou milieux naturels, zones humides ou surfaces en eau. **Le taux d'artificialisation varie de 0,6 % en Lozère jusqu'à 97,6 % à Paris** (CGDD-DATAR, 2009). L'Île-de-France, le Nord, l'Alsace, le couloir rhodanien et le littoral en général, régions à forte densité de population permanente ou saisonnière, sont plus artificialisés que le reste du territoire. En 2012, 9,1 % du territoire métropolitain était artificialisé et de 2006 à 2012, 68 167 hectares ont été artificialisés chaque année (ONB, 2014).

En 2010, 21,8 % du territoire français est composé de communes appartenant à des unités urbaines⁽²⁾ (plus 19 % en 10 ans), soit 119 000 km² contre 100 000 km² en 1999. Cette dynamique a principalement pu être observée sur les littoraux atlantiques et méditerranéens ainsi que dans les Alpes (Clanché et Rascol, 2011).

Le développement urbain s'accompagne souvent d'un développement des réseaux de transport et d'éclairages associés. Il est ainsi à l'origine de multiples pressions sur les écosystèmes du fait notamment de l'imperméabilisation des sols et de la disparition des continuités écologiques par les infrastructures matérielles comme par la lumière. Ces pressions ne sont pas le seul fait des unités urbaines. Plus de 31 500 communes rurales maillant le territoire y contribuent également.

⁽¹⁾ Une espèce de mammifère sur quatre, un oiseau sur huit et plus d'un amphibien sur trois sont menacés d'extinction, selon l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN).

⁽²⁾ Les villes correspondent à des agglomérations urbaines de plus de 2 000 habitants. Ce pourcentage s'appuie sur les limites administratives des communes concernées. Ceci ne signifie donc pas que l'ensemble de la surface de ces territoires soit artificialisé (pour plus de détail sur la définition, consulter le site de l'Insee).

Les différentes externalités et les impacts de l'éclairage artificiel sur le vivant n'étaient pas pris en compte jusqu'à présent. Ces dernières décennies, l'éclairage extérieur nocturne n'a cessé de croître (multiplication des équipements, diversification des sources, durée d'éclairage), ce développement évoluant notamment avec la tendance d'artificialisation des sols. De fait, on retrouve par exemple, une grande concentration de points lumineux sur le littoral, à proximité des côtes, des points d'eau (rivières, étangs et lacs) ainsi que dans les vallées formées par les cours d'eau.

1.1.2 Le cadre juridique français de la préservation de la biodiversité

La législation française concernant la protection de la biodiversité et des écosystèmes reste relativement récente. On peut en particulier mentionner quatre textes nationaux qui tentent progressivement de répondre aux enjeux de la biodiversité.

La loi de protection de la nature

Le 10 juillet 1976, l'adoption de la loi relative à la protection de la nature donne à celle-ci un caractère d'intérêt général, impose la réalisation d'études d'impacts pour tous travaux ou projets d'aménagement et introduit la séquence éviter, réduire compenser (ERC). Cette loi est à l'origine des listes d'espèces végétales et animales protégées.

Son introduction précise : « La protection des espaces naturels et des paysages, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques auxquels ils participent et la protection des ressources naturelles contre toutes les causes de dégradation qui les menacent sont d'intérêt général. Il est du devoir de chacun de veiller à la sauvegarde du patrimoine naturel dans lequel il vit. Les activités publiques ou privées d'aménage-

ment, d'équipement et de production doivent se conformer aux mêmes exigences. La réalisation de ces objectifs doit également assurer l'équilibre harmonieux de la population résidant dans les milieux urbains et ruraux. »

La stratégie nationale pour la biodiversité (SNB)

La Stratégie Nationale pour la Biodiversité de 2004 faisait écho à la convention cadre sur la diversité biologique (CDB) adoptée lors du sommet de la terre à Rio en 1992 et ratifiée par la France en 1994. Cette première SNB, qui constituait un des volets de la Stratégie Nationale pour le Développement Durable (SNDD, adoptée en 2003), avait pour but de stopper l'érosion de la biodiversité à l'horizon 2010 afin de répondre à l'objectif issu de la conférence de Johannesburg de 2002. Force fut de constater que cet objectif n'a pu être atteint.

La nouvelle SNB (2011-2020) souhaite à nouveau concrétiser l'engagement français au titre de la convention sur la diversité biologique (CDB). Les objectifs dits d'Aichi du plan stratégique de la CDB, adoptés au Japon en octobre 2010, les objectifs définis en 2010 par l'Union européenne, ainsi que le cadre d'action proposé par la Commission européenne pour la biodiversité à l'échéance 2020 lui donnent une impulsion forte. Elle a pour objectif « de préserver et restaurer, renforcer et valoriser la biodiversité, en assurer l'usage durable et équitable, réussir pour cela l'implication de tous et de tous les secteurs d'activité » (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie). Cette SNB est appelée à être déclinée à l'échelle régionale à travers les stratégies régionales pour la biodiversité (SRB).

Les espaces naturels protégés français

Afin de préserver le patrimoine naturel riche dont est doté la France, les sites naturels les plus riches ont fait l'objet d'un classement en aires protégées.

Tableau 1 : Les espaces protégés français (Adapté de UICN, 2010)

<i>Protection conventionnelle*</i>	<i>Protection réglementaire**</i>	<i>Protection de la maîtrise foncière***</i>	<i>Protection au titre d'un texte européen ou international</i>	<i>Les espaces protégés des collectivités françaises d'outre-mer</i>
- Parcs naturels régionaux - Parcs naturels marins	- Parcs nationaux - Réserves naturelles nationales/régionales/ de Corses - Réserves biologiques - Réserves de chasse et de faune sauvage - Sites classés et sites inscrits	- Espaces du conservatoire du littoral - Espaces d'intervention des Conservatoires d'espaces naturels - Espaces naturels sensibles	- Sites Natura 2000 - Zones humides d'importance internationale (sites RAMSAR) - Réserves de biosphère - Sites naturels et mixtes inscrits au Patrimoine mondial de l'UNESCO	- Nouvelle-Calédonie - Polynésie française - Terres Australes et Antarctiques Françaises - Wallis et Futuna - Saint-Pierre-et-Miquelon

* L'approche conventionnelle vise à déléguer à un tiers pour une durée déterminée la gestion et la préservation d'un espace naturel dans le cadre d'une convention de maîtrise d'usage.

** L'approche réglementaire consiste à limiter voire à interdire généralement par arrêté ou par décret des activités humaines en fonction de leurs impacts sur les milieux naturels.

*** L'approche foncière repose sur l'acquisition de terrains en pleine propriété en vue d'assurer la protection définitive d'un espace naturel remarquable.

La Trame Verte et Bleue (TVB)

La loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement a permis de faire émerger le projet national Trame Verte et Bleue. Il vise « à réduire le phénomène de fragmentation des habitats naturels et à diminuer les contraintes de déplacement des espèces » (Medde, 2010).

Cette TVB est définie à l'échelle régionale à travers les Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE) qui ont notamment pour objet l'identification des corridors et réservoirs de biodiversité sur les territoires. Ils doivent respecter les orientations nationales.

Le décret n° 2014-45 du 20 janvier 2014 portant adoption des orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques, mentionne dans son document cadre comme **l'un des objectifs de la TVB « de maîtriser l'urbanisation et l'implantation des infrastructures et d'améliorer la perméabilité des infrastructures existantes, en intégrant des problématiques connexes à l'urbanisation, notamment la pollution lumineuse ».**

Le projet de loi biodiversité 2015

Un projet de loi « Pour la reconquête de la Biodiversité, de la Nature et des Paysages » est examiné par le Parlement en 2015. Il part du constat que « partout dans le monde, l'état et les perspectives de conservation de la biodiversité restent préoccupants. Pour comprendre la biodiversité, mieux la protéger et la valoriser, il est nécessaire de changer la perception statique qui prévalait jusqu'alors en une vision complète et dynamique du sujet. »

A cette occasion, le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) rappelle qu'afin de mieux considérer la biodiversité et les services quelle nous procure « **il ne s'agit plus simplement de prendre des mesures de protection figées, mais d'appréhender la biodiversité comme une dynamique globale, incluant et interagissant avec la vie humaine. Le reconnaître, c'est mieux l'intégrer dans nos processus de décision et d'action.** ». Il s'agit d'une nouvelle approche.

1.2 L'éclairage extérieur : définitions, évolutions et enjeux

1.2.1 Eléments techniques

Les notions techniques relatives à l'éclairage artificiel utilisées dans ce dossier sont définies et explicitées dans la partie qui suit. Les impacts de l'éclairage artificiel sur l'environnement dépassant les effets de la lumière, un point informatif est également effectué sur le cycle de vie des sources lumineuses.

1.2.1.1. LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE LA LUMIÈRE OU DES LAMPES, ET LEURS MESURES

A. LES LONGUEURS D'ONDES :

La lumière est une onde électromagnétique. La longueur d'onde mesure la distance entre deux cycles consécutifs d'une onde. **Chaque rayonnement lumineux avec une couleur bien précise peut être caractérisé par une longueur d'onde exprimée en nanomètres (nm).** Chaque source de lumière artificielle suivant le processus physique d'émission de la lumière va émettre dans différentes longueurs d'onde. **Ainsi, chaque lampe possède sa propre signature spectrale** (voir Tableau 4 page 12).

Le spectre lumineux peut être divisé en trois catégories :

- le rayonnement ultraviolet : inférieur à 400 nm ;
- le rayonnement visible : 400 à 700 nm ;
- le rayonnement infra-rouge : supérieur à 700 nm.

Tableau 2 : Le spectre lumineux (MEB-ANPCEN, 2015)

Longueurs d'ondes (nm)	
UV	<400
Violet	400 - 420
Bleu	420 - 500
Vert	500 - 575
Jaune	575 - 585
Orange	585 - 605
Rouge	605 - 700
IR	>700

B. LA TEMPÉRATURE DE COULEUR DES LUMIÈRES :

La température de couleur d'une source lumineuse correspond à la température d'un corps noir chauffé jusqu'à obtenir une couleur identique à la couleur principale d'émission de la source⁽³⁾ lumineuse considérée. Elle est mesurée en degrés Kelvin (K). Les lumières dont la température de couleur se trouve en-dessous de 3 000-3 500 K peuvent être considérées comme des lumières chaudes par opposition aux lumières dites froides (> 3 500 K).

Figure 1 : La température de couleur

(Charte de l'éclairage du syndicat départemental de l'énergie 35, 2013)



⁽³⁾ Le spectre d'émission des sources de lumière artificielle à décharges et à LED est cependant bien différent de celui d'un corps noir et on ne peut pas faire de lien direct entre la température de couleur et la distribution spectrale d'une source. Pour une même technologie de lampe, on peut quand-même déduire que plus la température de couleur d'une source est élevée, plus l'émission dans les basses longueurs d'ondes (violet, bleu, vert) est importante.

C. L'INDICE DE RENDU DES COULEURS :

L'indice de rendu des couleurs (IRC ou encore Ra) correspond à la capacité d'une source lumineuse à pouvoir restituer les différentes couleurs du spectre visible. Plus l'IRC est proche de 100 plus cette capacité est proche de celle de la lumière du jour (IRC ou Ra = 100).

D. LA PUISSANCE LUMINEUSE (lm) :

La puissance lumineuse (ou encore appelée flux lumineux) est la quantité globale de lumière émise par une source dans toutes les directions possibles de l'espace à un instant donné. Elle s'exprime en Watt dans le cas général⁽⁴⁾ où l'on considère l'ensemble du spectre lumineux ; et en lumens si on considère que le récepteur de la lumière émise est l'œil humain en vision photopique (i.e. en vision de jour).

E. L'INTENSITÉ LUMINEUSE (cd) :

L'intensité lumineuse est la quantité de lumière émise dans une direction précise et perçue par l'œil humain en vision photopique. Elle s'exprime en candéla. L'intensité lumineuse émise par une bougie est en moyenne égale à un candela.

F. LA LUMINANCE (cd/m²) :

La luminance correspond à la perception visuelle d'une source lumineuse ou d'une surface éclairée. Elle est calculée comme étant l'intensité lumineuse moyenne provenant de cette surface divisée par l'aire apparente de cette dernière. Elle s'exprime pour un œil humain adapté à la vision du jour en candéla par m² (cd/m²).

G. LES LUX (lx) :

Mesure l'éclairage qui correspond au flux lumineux reçu par une surface éclairée d'un mètre carré. Ainsi, le niveau d'éclairage d'une surface éclairée d'un mètre carré située à un mètre de la source lumineuse l'atteignant dont le flux lumineux est égal à 400 lumens, est égal à 400 lux (voir figure 3).

H. L'EFFICACITÉ LUMINEUSE (lm/W) :

L'efficacité lumineuse définit la quantité de lumière émise par quantité d'énergie consommée et est exprimée en lumen par watt (lm/W). Une efficacité lumineuse élevée devrait logiquement permettre de diminuer la puissance électrique consommée par point, et ce, pour le même niveau d'éclairage et devrait entraîner en amont la diminution de la puissance installée.

Figure 2 : Lumen et Lux
(energie-environnement.ch)



Tableau 3 : Eclairage en fonction des lieux et de leur fonctionnalité

(Adapté de www.energie-environnement.ch, LUX*, Schubert**, Gaston et al., 2013)

Lieux et fonctionnalités	Eclairage au niveau du sol
Nuit naturelle sans lune par ciel nuageux	0,00003-0,0001 lux
Nuit naturelle sans lune par ciel clair	0,001 lux
Pleine lune	0,1 – 0,2 lux
Trottoirs piétons	5 lux
Eclairage public dans les rues	10 lux***
Passages piétons	50 lux
Salle de bain et WC	200 lux
Pièces à vivre	100 à 400 lux
Eclairage de bureau	100 à 1 000 lux
Eclairage dans un bloc opératoire	> 10 000 lux
Lumière du soleil	100 000 lux

* LUX (2004). Les normes européennes de l'éclairage : Eclairage public, lieux de travail, stades. Lux : la revue de l'éclairage. N°228.

** SCHUBERT E. F. (ND). Human eye sensitivity and photometric quantities. The research group of E. Fred Schubert. Rensselaer Polytechnic Institute. Chapter 16.

*** Cette valeur est indicative. Le niveau d'éclairage directement sous les luminaires est souvent supérieur et peut varier de 10 lux jusqu'à 100 lux.

⁽⁴⁾ On parle alors stricto sensu de puissance rayonnée ou flux énergétique quand le rayonnement émis par une source n'est pas pondéré par une courbe de sensibilité du milieu récepteur de cette lumière.

Figure 3 : L'indice de rendu des couleurs par lampe

(Schéma adapté de la Charte de l'éclairage public du syndicat départemental de l'énergie 35, 2013)



Figure 4 : Exemples d'efficacité lumineuse

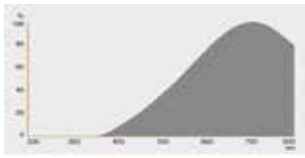
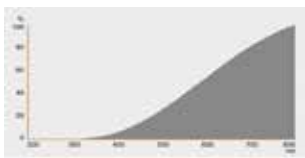
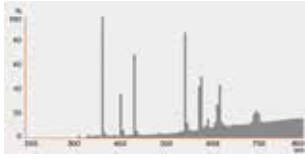
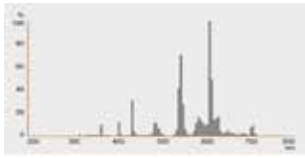
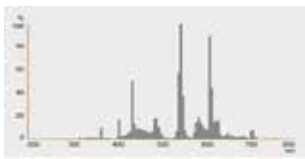

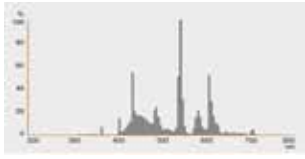
(Schéma provenant de la Charte de l'éclairage public du syndicat départemental de l'énergie 35, 2013)

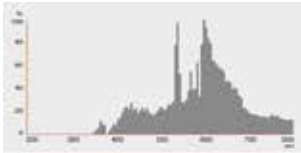
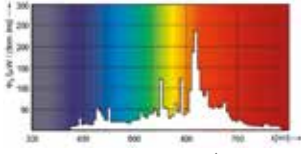
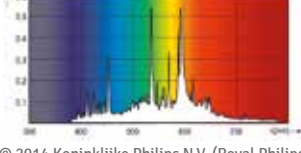
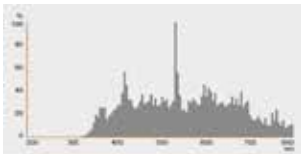

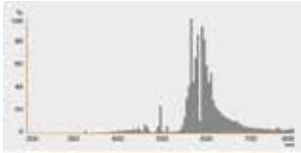

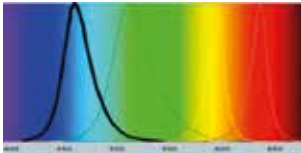


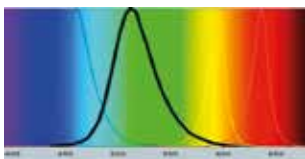
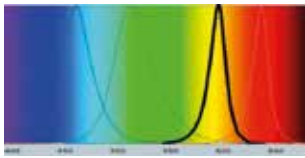
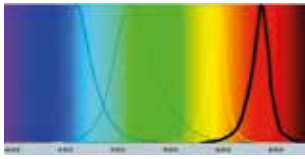
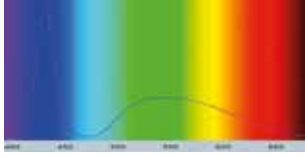
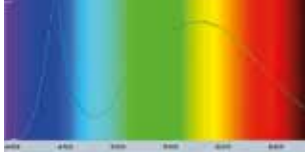
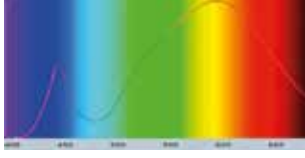
© EyeEmCLOSED

I. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES POUR LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE LAMPES UTILISÉES EN ÉCLAIRAGE EXTÉRIEUR

Tableau 4 : Caractéristiques générales des principales familles de lampes utilisées pour l'éclairage extérieur

Famille	IRC (Ra)*	Efficacité lumineuse (lm/W)*	Teinte**	Distribution spectrale représentative*	Domaines d'application
Halogène	95 - 100	<15	Blanc Froid (> 3 000° K)		- Jardins privés (particuliers, hôtels)
	100	<20	Blanc Chaud (< 3 000° K)		
Vapeur de Mercure (exclue du marché en avril 2015 par le règlement européen 245/2009)	50-60	40-60	Blanc		- Rues - Cheminements résidentiels - Zones piétonnes, places - Usines
Fuo compacte	80 - 90	60 - 80	Blanc à Blanc Chaud (< 3000° K)		- Cheminements résidentiels (encastrés et hublots) - Jardins privés - Zone de travail en extérieur - Site industriel en extérieur
	80 - 90	75	Blanc Froid (> 4000° K)		
Tube Fluorescent	90	85 - 90	Blanc à Blanc Chaud (< 3 000° K)		- Bâtiments publics tunnels, voies souterraines
	80	85 - 90	Blanc Froid (> 4 000° K)		

<p>Lampe à décharge Iodures Métalliques technologie céramique</p>	<p>75 - 80</p>	<p>80 - 100</p>	<p>Blanc</p>	 <p>© 2014, OSRAM GmbH</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en lumière architecturale - Zones piétonnes urbaines - Pistes cyclables
<p>Lampe céramique à Iodures Métalliques de nouvelle génération</p>	<p>60</p>	<p>90 - 120</p>	<p>Blanc Chaud (< 3000° K)</p>	 <p>© 2014 Koninklijke Philips N.V. (Royal Philips)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Zones piétonnes, places publiques, voiries
	<p>60</p>	<p>90 - 120</p>	<p>Blanc Froid (> 4000° K)</p>	 <p>© 2014 Koninklijke Philips N.V. (Royal Philips)</p>	
<p>Lampe à décharge Iodures Métalliques technologie quartz</p>	<p>~70</p>	<p>75 - 90</p>	<p>Blanc Froid (> 4000°K)</p>	 <p>© 2014, OSRAM GmbH</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bâtiments, monuments, ponts - Zones piétonnes, places publiques - Parcs et jardins - Installations industrielles - Quais et installations portuaires - Gare de triage, installation de transbordement de conteneurs
	<p>70 - 80</p>	<p>75 - 90</p>	<p>Blanc à Blanc Chaud (< 3500°K)</p>	 <p>© 2014, OSRAM GmbH</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bâtiments, monuments, ponts - Zones piétonnes, places publiques - Parcs et jardins
<p>Sodium Haute Pression</p>	<p>25</p>	<p>90 - 150</p>	<p>Jaune-orangé (<2100°K)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Rues - Installations industrielles
<p>Sodium Basse Pression</p>	<p>Pas de mesure d'IRC</p>	<p>120 - 180</p>	<p>Orange (1800°K)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Rues - Tunnels, voies souterraines - Voies navigables, écluses
<p>LEDs Bleues</p>	<p>Pas de mesure d'IRC</p>	<p>ND</p>	<p>Bleu</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Mise en lumière architecturales, infrastructures et paysage

LEDs Vertes	Pas de mesure d'IRC	ND	Vert		- Mise en lumière architecturales, infrastructures et paysage
LEDs Ambrées à spectre étroit***	Pas de mesure d'IRC	ND	Ambre		- Voiries - Mise en lumière architecturales, infrastructures et paysage
LEDs Rouges	Pas de mesure d'IRC	ND	Rouge		- Mise en lumière architecturales, infrastructures et paysage
LEDs Blanches	70 - 75	100 - 125	Blanc Froid (> 6000° K)		- Voiries - Places, espaces piétons - Parcs et espaces verts - Mise en lumière de bâtiments - Mise en lumière d'infrastructures
	75	90 - 110	Blanc Neutre (~4000° K)		
	75 - 80	90 - 110	Blanc Chaud (~3000° K et moins)		

Données issues des catalogues de fabricants de lampes et de luminaires (OSRAM, Philips, LEC), de l'Agence Concepto, des synthèses issues des documents de l'ANPCEN.

*Ces profils techniques peuvent varier suivant les modèles de lampes existants dans chaque famille. Il est donc indispensable d'obtenir le spectre détaillé pour chaque modèle de lampe vendu afin d'en évaluer précisément les impacts potentiels.

**La teinte des lampes varie en fonction de la température de couleur. Il est ainsi possible de modifier la teinte en jouant sur le profil spectral. Par exemple pour les LEDs, on peut clairement identifier une différence entre le profil spectral des LEDs « Blanc Froid » (> 6000 k) dans lequel on note une forte proportion de lumière bleue, et les LEDs « Blanc Chaud » dont le profil spectral émet davantage dans les grandes longueurs d'ondes même si l'on peut toujours noter, mais dans une moindre mesure, la présence d'un pic d'émission dans le bleu.

***Il existe des LEDs ambrées à spectre plus large dont les caractéristiques se rapprochent de celles d'une lampe à sodium haute pression. Les caractéristiques des LEDs ambrées à spectre étroit se rapprochent beaucoup de celles d'une lampe à sodium basse pression.

© MEB-ANPCEN 2015

1.2.1.2. DES CRITÈRES TECHNIQUES IMPORTANTS À PRENDRE EN CONSIDÉRATION DANS LES CHOIX

Différents critères doivent être intégrés dans les choix pour une approche globale des coûts, des performances et des impacts d'un éclairage artificiel. Ne sont évoqués ici que quelques-uns d'entre eux.

A. L'ORIENTATION DU FLUX LUMINEUX (ULOR) :

L'orientation d'un flux lumineux dans sa globalité peut être caractérisée par son ULOR (Upward Light Output Ratio). Celui-ci définit la fraction du flux lumineux émis par la source lumineuse du luminaire au-dessus de l'horizontale. Un ULOR installé égal à zéro signifie qu'aucun flux sortant du luminaire n'est émis directement en direction du ciel⁽⁵⁾. Ceci est une condition nécessaire pour n'éclairer que la surface utile mais elle n'est pas toujours suffisante pour contrôler au mieux l'orientation⁽⁶⁾ afin d'éviter les problèmes d'éblouissement et d'éclairage inutile des milieux environnants. Ce critère est aussi primordial pour réduire au minimum les halos lumineux visibles à distance des sources.

B. HAUTEUR ET ESPACEMENT DES CANDÉLABRES

La hauteur et l'écart entre les candélabres devraient être choisis en fonction des besoins réels, de la voie à éclairer, du type de lampe et des propriétés optiques du réflecteur choisi servant à orienter la lumière vers la zone à éclairer tout en limitant l'éblouissement. Une étude photométrique en amont est utile pour s'assurer de l'adéquation entre le choix du matériel et les besoins locaux précisément définis.

C. LE CYCLE DE VIE DES LAMPES

À l'image d'autres technologies ou produits de consommation, les lampes résultent d'un cycle de vie complet, souvent insuffisamment appréhendé globalement. La fabrication des lampes nécessite des ressources primaires dont l'utilisation induit des tensions sur la raréfaction de ressources, le cours des matières premières, des enjeux de dépendance ou indépendance, de consommations d'énergie, de pollutions et de destructions écologiques avec des conséquences environnementales et sanitaires.

À l'heure d'objectifs publics visant à construire par tous une économie circulaire plus économe en matières premières, il convient de noter que les étiquettes environnementales, devenues obligatoires depuis septembre 2013 et mars 2014 pour l'éclairage domestique, ne qualifient à ce jour que très partiellement les différents enjeux attachés aux lampes et luminaires pour l'éclairage extérieur. Les

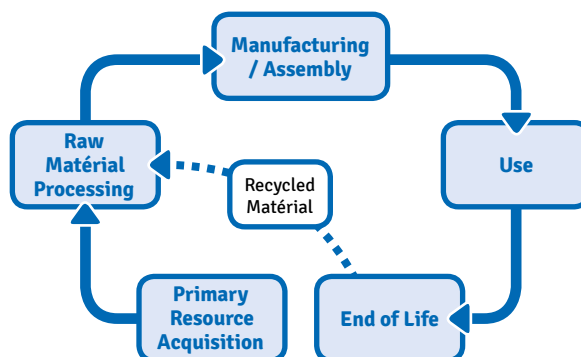
effets de l'ensemble du cycle de vie, les consommations de ressources et matières premières, les impacts sur le vivant, leur capacité de recyclage et le groupe de risque de sécurité photobiologique des différents types d'éclairage n'y sont pas exprimés pour guider les acheteurs.

Pourtant, le développement et la concentration de l'offre vers des produits électroniques comme les LEDs exerce et exercera des pressions croissantes sur des ressources naturelles non renouvelables, donc limitées. Ces technologies sont entre autres très demandeuses en terres rares (métaux et minéraux) dont la production mondiale est principalement concentrée en Chine (95 %) et dont l'extraction ou le raffinage conduisent aux rejets de métaux lourds ou radioactifs.

En termes de consommation d'énergie, des analyses de cycle de vie de différentes lampes montrent que la phase d'utilisation représente, de très loin, la phase la plus consommatrice en énergie : 99 % pour les lampes à incandescence et en moyenne 95 % pour les LEDs et les lampes fluorescentes compactes (U.S. Department of Energy, 2012).⁽⁷⁾

Les résultats de l'analyse du cycle de vie de Dale et al. (2011) sur les phases de fabrication et d'usage, montrent que les LEDs seraient globalement moins énergivores que les lampes aux halogénures métalliques et sodium haute pression en prenant pour hypothèse une durée de vie de 60 000 h pour les LEDs. Si le bilan d'écotoxicité des LEDs serait meilleur que pour d'autres lampes, cependant, l'étude reconnaît qu'il existe des incertitudes concernant les données utilisées pour l'analyse menée sur la partie « fabrication ». De plus, les phases de recyclage et d'approvisionnement en matières premières ne sont pas étudiées dans cet article. Il est finalement important de rappeler que les analyses de cycle de vie n'intègrent pas encore les effets de la lumière artificielle nocturne émise par les sources lumineuses sur l'environnement dont il est question dans cette étude.

Figure 5 : Les phases du cycle de vie d'un produit technologique (U.S. Department of Energy, 2012)



⁽⁵⁾ Attention si la tête du luminaire est inclinée lors de l'installation, la valeur de l'ULOR sera modifiée. L'ULOR du luminaire, mesuré en laboratoire avec un angle de 0° n'est pas l'ULOR installé

⁽⁶⁾ On peut mieux caractériser l'orientation de la lumière en dessous de l'horizontale avec le système de classification BUG définie par l'Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). Voir par exemple : IESNA (ND). Fundamentals of lighting - ADDENDA #1 BUG RATINGS - Backlight, Uplight, and Glare. 6 p. <https://www.ies.org/pdf/education/ies-fol-addenda-1-%20bug-ratings.pdf>

⁽⁷⁾ La consommation d'énergie liée à la phase d'utilisation baisse à 76 % pour le mix énergétique utilisé en France (Tähhkämö et al. 2013)



© Gianluca D'Auri Muscelli

Les lampes représentent 80 % des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en nombre d'unités pour seulement 1 % de leur poids⁽⁸⁾. Les lampes à incandescence ne sont pas recyclées, mais sont considérées comme peu polluantes à l'état de déchets à la différence des lampes à décharge qui contiennent des produits potentiellement dangereux comme le mercure et le plomb, et doivent donc être recyclées. Les LEDs étant en partie composées de circuits électroniques, leur recyclage est indispensable. On y retrouve notamment du cuivre, du plomb, du fer, du nickel ou encore de l'argent ainsi que des terres rares qui devraient être traités et recyclés au sein d'une filière industrielle préparée à leur accroissement programmé.

⁽⁸⁾ D'autres équipements utilisés en éclairage font également partie des DEEE comme les luminaires et leurs dispositifs d'alimentation et de contrôle. (Grimaud, directeur de Recylum, 2009)

1.2.2 Evolutions et enjeux

L'éclairage apporte des services appréciables à la société.

Pourtant, l'éclairage artificiel est conçu par les humains pour eux-mêmes, sans prise en compte des besoins de la biodiversité, ni prise en compte de ses diverses externalités environnementales, sociales ou sanitaires, ou des nuisances qui impactent les écosystèmes et plus largement le vivant, humains compris. Outre l'augmentation importante du nombre de points lumineux au cours de quelques années seulement et récentes, les technologies de lampes utilisées ont évolué. Différentes causes concourent à accroître la quantité globale de lumière émise, à changer le type de lumière émise, avec ses nuisances et sa pollution lumineuse.

1.2.2.1. EVOLUTIONS DU NOMBRE DE POINTS LUMINEUX ET DES COÛTS

L'éclairage extérieur, public et privé, s'est fortement développé quantitativement au cours de la deuxième partie du 20^{ème} siècle suite au mouvement d'électrification des campagnes et les sources de lumière se sont également diversifiées. Ce développement s'est effectué avec de bas tarifs d'électricité jusqu'aux années 2000. Depuis, ceux-ci sont en forte hausse. Toutes les études confirment que cette tendance se confirmera dans les prochaines années, du fait notamment des investissements de maintenance et de renouvellement du parc de production nucléaire et thermique et du soutien nécessaire aux énergies renouvelables (Leinkugel Le Cocq, 2013). L'Ademe a notamment confirmé une hausse récente de 40 % des tarifs de l'éclairage public, en raison des règles européennes. De plus, il est important de noter que le coût d'achats de sources lumineuses à LEDS peut être de 4 à plus de 40 fois supérieur à des lampes de même catégorie en euros.

Aux coûts d'achat et de fonctionnement, s'ajoutent les coûts de maintenance (20 à 30 euros par point lumineux pour les lampes à décharge classique). Les coûts de maintenance seront d'autant plus élevés à terme que les technologies proposées ou leur gestion seront plus complexes, ce qui est la tendance actuelle.

Pourtant, entre 1992 et 2012, en France, le nombre de points lumineux en éclairage public a augmenté de 89 %. **On dénombrait aujourd'hui près de 11 millions de points lumineux⁽⁹⁾**. Il y a aussi eu une augmentation continue de la durée d'éclairage moyenne de 2 100 à 3 500 heures par an entre 1992 et 2005, pour une puissance installée d'environ 1 260 MW (ADEME, AFE et Syndicat de l'éclairage, 2010). Les derniers chiffres indiquent une légère baisse à 3 300 heures en 2012, due en grande partie à l'accroissement de la pratique d'une extinction partielle de l'éclairage public en cours de nuit par les communes (ADEME 2014).

A l'éclairage public présent sur les voiries, il faut ajouter la pollution et les nuisances lumineuses produites par la multiplication des enseignes⁽¹⁰⁾ et des publicités lumineuses, les éclairages d'équipements sportifs ou de parcs, les nombreux éclairages événementiels ou de mise en lumière du patrimoine ou de milieux naturels, ainsi que les éclairages des commerces et des industries ou encore des éclairages domestiques.

1.2.2.2. EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Au-delà de l'extension et de la densification des équipements d'éclairage et du quasi doublement de la durée d'éclairage, ces dernières décennies on a pu assister à une évolution des technologies utilisées. Ainsi, dans un premier temps, les lampes à incandescence ont

principalement été utilisées. Leur bande spectrale est particulièrement large, avec une forte émission dans les grandes longueurs d'ondes. Les années 1960 et 1970 ont vu l'émergence des lampes à sodium basse pression monochromatiques dans les couleurs orangées. Ce type de lampes, reconnu comme globalement moins impactant pour la biodiversité (Gaston et al., 2012), a ensuite été remplacé par des lampes dont les émissions se situent davantage dans le jaune clair (les lampes au sodium à vapeur haute pression) puis le blanc (les lampes à vapeur de mercure dont le spectre large émet notamment dans les très basses longueurs d'ondes dont les UV). La recherche de lampes moins énergivores et avec un indice de rendu de couleurs (IRC) très élevé, pour voir les objets dans nos villes la nuit sans différence avec la perception du jour, ont conduit à la multiplication des lampes aux iodures métalliques à brûleur céramique et aux LEDS blanches⁽¹¹⁾.

On peut noter que la rénovation du parc d'éclairage public français est un enjeu économique important par lequel les acteurs économiques espèrent modifier le taux naturel de 3 % annuel de remplacement des lampadaires notamment pour un parc aujourd'hui saturé : « plus de la moitié du parc est composée de matériels obsolètes et énergivores : boules diffusantes, lampes à vapeur de mercure (un peu moins d'un 1/3 du parc), et 40 % des luminaires en service ont plus de 25 ans » (ADEME, AFE et Syndicat de l'éclairage, 2010).

Par une analyse satisfaisante des besoins réels et des approches moins standardisées par des normes non obligatoires, avec des évolutions d'usages et comportements, des solutions de bon sens, et une approche globale des coûts et impacts, les années à venir ouvrent l'opportunité d'innover et réduire la quantité globale de lumière émise, pour diminuer les consommations d'énergie ainsi que la pollution et les nuisances lumineuses.

1.2.2.3. LES NOTIONS DE POLLUTION ET NUISANCES LUMINEUSES

Kobler (2002) définit la pollution lumineuse comme « le rayonnement lumineux infrarouge, UV et visible émis à l'extérieur ou vers l'extérieur, et qui par sa direction, intensité ou qualité, peut avoir un effet nuisible ou incommode sur l'homme, sur le paysage ou les écosystèmes. »

En se basant sur l'article 41 de la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite Grenelle I, les « nuisances lumineuses » peuvent être définies comme « **les émissions de lumière artificielle de nature à présenter des dangers ou à causer un trouble excessif aux personnes,**

⁽⁹⁾ Ademe Lafitte, 2014

⁽¹⁰⁾ 3,5 millions d'enseignes lumineuses sont présentes sur le territoire français

⁽¹¹⁾ Au-delà de leur longévité annoncée, qu'il conviendra de vérifier dans le temps in situ, et de leur faible consommation, ces technologies permettent également une plus grande flexibilité. Il est en effet possible de faire varier avec une grande amplitude les niveaux d'éclairage grâce à un système de gradation des LEDS. La gradation permet une gestion fine de la puissance électrique fournie à la lampe et donc de l'éclairage produit. Ces technologies doivent pourtant être désormais analysées dans un bilan global, incluant notamment le cycle de vie global, leur surcoût et le coût de leurs impacts.

à la faune, à la flore ou aux écosystèmes, entraînant un gaspillage énergétique ou empêchant l'observation du ciel nocturne (...) »

La Commission européenne⁽¹²⁾ a défini en 2009 la « pollution lumineuse » comme la somme de toutes les incidences négatives de la lumière artificielle sur l'environnement, y compris l'incidence de la lumière intempestive.

Le CGEDD a estimé en 2014 qu'il y avait précisément lieu de parler de « pollution lumineuse » vis-à-vis des écosystèmes et de la santé : « la lumière artificielle constitue un véritable altéragène dégradant l'actif environnemental qu'est le noir. La perte de qualité de cet actif génère ainsi l'appauvrissement des milieux (désertion de niches, modification des équilibres intra et inter spécifiques, perte de biodiversité, ou du point de vue de la santé, la perturbation de plusieurs fonctions métaboliques par le biais de désynchronisations hormonales. » (CGEDD, 2014).

D'une manière générale, l'ANPCEN indique que les nuisances ou la pollution lumineuses combinent des aspects qualitatifs et quantitatifs d'effets de la lumière artificielle nocturne :

- Augmentation de la quantité globale de lumière artificielle nocturne émise ;
- Dans différentes parties du spectre des lumières (ou « couleurs » des lampes utilisées) ayant plus ou moins d'impacts sur le vivant ;
- Rupture de l'alternance entre le jour et la nuit ;
- Halos lumineux ;
- Eblouissements ;
- Lumières intrusives (sur les façades et entrant dans les maisons ou appartements) ;
- Propagation de la lumière à distance des sources dans l'atmosphère ou dans les milieux.

La lumière comme toutes les ondes électromagnétiques se propage à distance des sources d'émission et peut donc apporter des nuisances dans un milieu, même en l'absence de points d'éclairage à proximité, soit directement sous forme d'éblouissement, soit indirectement en augmentant le niveau de luminance ambiante⁽¹³⁾ par les halos lumineux dont l'intensité peut varier suivant la transparence de l'atmosphère (dépendant du taux d'humidité, du contenu en aérosols naturels et anthropique), la distribution spectrale de la lumière émise⁽¹⁴⁾ et la couverture nuageuse. **La lumière peut donc agir à plus grande échelle et à distance contrairement à un élément de fragmentation matériel comme une route non éclairée.** Les lumières littorales sont, par exemple, perceptibles à très longue distance en mer.

⁽¹²⁾ Règlement (CE) No 245/2009 de la Commission Européenne du 18 mars 2009

⁽¹³⁾ Les quantités de lumière provenant de différentes sources isolées s'ajoutent entre elles pour chaque longueur d'onde.

⁽¹⁴⁾ La lumière à basse longueur d'onde (bleue par exemple) est beaucoup plus diffusée dans l'atmosphère par les molécules (loi physique de Rayleigh) et par les aérosols dans une moindre mesure (loi physique de Mie) ce qui contribue à augmenter les halos lumineux visibles à distance des sources.

L'éclairage artificiel a été conçu pour les humains pour leur propre utilité. Il a donc été adapté à leur vision spécifique et leurs activités. L'éclairage artificiel tel qu'il est conçu ne prend ainsi pas en compte les gênes et perturbations qui peuvent impacter l'ensemble du monde vivant. En effet, l'éclairage artificiel peut perturber la synchronisation biologique naturelle des individus exposés ainsi que leur propre perception visuelle, engendrant alors des perturbations dans leurs activités et plus globalement dans les interactions internes à l'écosystème considéré (Gaston et al., 2013) (cf. partie 2).

L'environnement constitue l'un des trois piliers du développement durable. Il est décisif que l'ensemble des secteurs et des acteurs concernés intègre au XXI^{ème} siècle les nuisances lumineuses dans des démarches responsables prenant en compte notamment la question des impacts de la lumière artificielle sur le vivant.

1.2.3 Eclairage extérieur et impacts : le cadre juridique

1.2.3.1. EST-IL OBLIGATOIRE D'ÉCLAIRER EN FRANCE ?

L'article L. 2212-2 du code général des collectivités territoriales (CGCT), attribue au maire la mission suivante : « **le bon ordre, la sûreté, la sécurité et la salubrité publiques** » comprenant notamment « la sûreté et la commodité du passage dans les rues, quais, places et voies publiques », espaces sur lesquels l'éclairage public est présent. **Cette responsabilité n'implique pas une obligation d'éclairer.**

En réponse à une question de M. Bernard Fournier sénateur de la Loire datant du 12 juillet 2012 au sujet de la réglementation en matière d'éclairage public, le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie dans le Journal Officiel du Sénat le 4 avril 2013, précise qu'il « appartient au maire de décider quel espace doit recevoir un éclairage artificiel ou non, selon les usages et règles de l'art en vigueur ». ⁽¹⁵⁾

1.2.3.2. EST-IL OBLIGATOIRE D'AGIR POUR LIMITER VOIRE ÉVITER LES NUISANCES LUMINEUSES ET LEURS EFFETS EN FRANCE ?

En 2009, l'article 41 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite Grenelle 1 dispose que : « **les émissions de lumière artificielle de nature à présenter des dangers ou à causer un trouble excessif aux personnes, à la faune, à la flore ou aux écosystèmes, entraînant un gaspillage énergétique ou empêchant l'observation du ciel nocturne feront l'objet de mesures de prévention, de**

⁽¹⁵⁾ <http://www.senat.fr/quesdom.html>

suppression ou de limitation. » L'obligation de mener des actions visant à éviter les nuisances lumineuses est donc définie juridiquement.

Suite à l'adoption de la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, l'article L 583-1 du code de l'environnement stipule que : « Pour **prévenir ou limiter les dangers ou trouble excessif aux personnes et à l'environnement causés par les émissions de lumière artificielle** et limiter les consommations d'énergie, **des prescriptions peuvent être imposées, pour réduire ces émissions**, aux exploitants ou utilisateurs de certaines installations lumineuses, sans compromettre les objectifs de sécurité publique et de défense nationale ainsi que de sûreté des installations et ouvrages sensibles. »

Le décret n° 2011-831 du 12 juillet 2011 portant sur la prévention et à la limitation des nuisances lumineuses, relatif à l'article 173 de la Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, précise :

« Dans les espaces naturels mentionnés [les réserves naturelles et périmètres de protection, les parcs naturels régionaux, les parcs naturels marins, les sites classés et inscrits, les sites Natura 2000] (...) ainsi que dans les sites d'observation astronomique, dont la liste et le périmètre sont fixés par un arrêté du ministre chargé de l'environnement pris après avis du ministre chargé de la recherche quand sont en cause des sites d'observation placés sous son autorité, les installations lumineuses font l'objet de mesures plus restrictives que celles appliquées aux dispositifs implantés en agglomération et en dehors des agglomérations. »

Le décret précise également :

« Ces prescriptions peuvent notamment porter sur les niveaux d'éclairement (en lux), l'efficacité lumineuse et énergétique des installations (en watts par lux et par mètre carré) et l'efficacité lumineuse des lampes (en lumens par watt), la puissance lumineuse moyenne des installations (flux lumineux total des sources rapporté à la surface destinée à être éclairée, en lumens par mètre carré), les luminances (en candélas par mètre carré), la

limitation des éblouissements, la distribution spectrale des émissions lumineuses ainsi que sur les grandeurs caractérisant la distribution spatiale de la lumière »

Le décret n°2012-118 du 30 janvier 2012 relatif à l'éclairage nocturne des enseignes et publicités lumineuses, entré en application le 1^{er} juillet 2012 spécifie notamment : « Dans les unités urbaines de moins de 800 000 habitants, les publicités lumineuses sont éteintes entre 1 heure et 6 heures, à l'exception de celles installées sur l'emprise des aéroports, de celles éclairées par projection ou transparence supportées par le mobilier urbain et des publicités numériques supportées par le mobilier urbain, à condition que leurs images soient fixes ». De même, les « enseignes lumineuses sont éteintes entre 1 heure et 6 heures, lorsque l'activité signalée a cessé. »

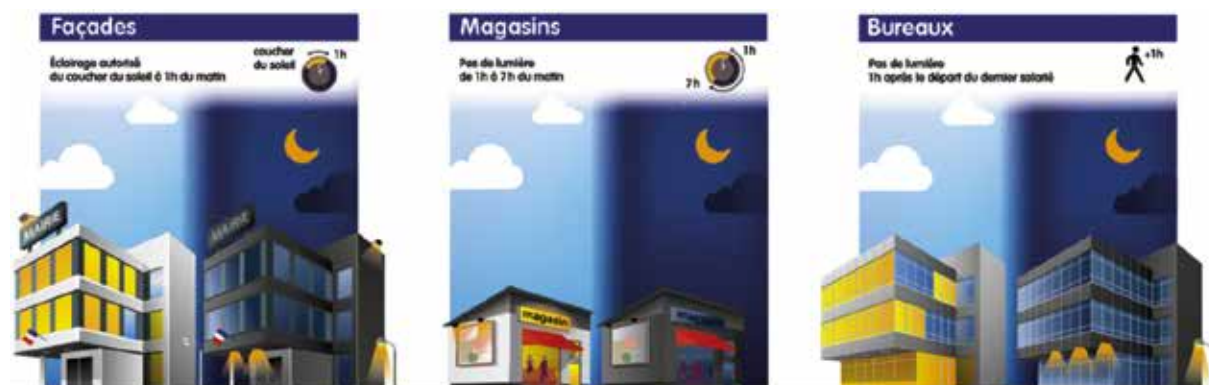
Les modalités du décret de janvier 2012 ont ensuite été modifiées par une loi et un décret suivants.

L'arrêté du 25 janvier 2013 relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels afin de limiter les nuisances lumineuses et les consommations d'énergie, entré en application le 1^{er} juillet 2013 est une première mesure concrète qui prévoit notamment que :

- Les éclairages intérieurs de locaux à usage professionnel sont éteints une heure après la fin de l'occupation de ces locaux (Art.2) ;
- Les illuminations des façades des bâtiments ne peuvent être allumées avant le coucher du soleil. (Art. 3) ;
- les éclairages des vitrines de magasins de commerce ou d'exposition soient éteints au plus tard à 1 heure ou une heure après la fin de l'occupation de ces locaux si celle-ci intervient plus tardivement (Art. 2) ;
- les éclairages des vitrines de magasins de commerce ou d'exposition puissent être allumés à partir de 7 heures ou une heure avant le début de l'activité si celle-ci s'exerce plus tôt (Art. 3).⁽¹⁶⁾

⁽¹⁶⁾ Consulter les deux bilans de son application réalisés par l'Anpcen : www.anpcen.fr

Figure 6 : L'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels (MEDDE, 2013)



1.2.3.3. LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE

Le règlement CE 245/2009 (modifiée par CE 347/2010) est l'application de la directive 2005/32/CE - relative aux seules exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits consommateurs d'énergie - pour les produits principalement utilisés dans les bureaux, les industries et l'éclairage urbain. Dans un objectif de réduction des consommations d'énergie, il vise à exclure du marché les lampes jugées les plus énergivores selon le calendrier ci-dessous. Il définit la pollution lumineuse comme la somme de toutes les incidences négatives de la lumière artificielle sur l'environnement, y compris l'incidence de la lumière intempestive.

Figure 7 : Lampes utilisées en éclairage extérieur exclues du marché par le règlement européen 245/2009 (ADEME, AFE et Syndicat de l'éclairage, 2010)

	Lampes fluorescentes T10 (tubes de 32mm de diamètre) et T12 (tubes de 38mm de diamètre)
Avril 2012	Les moins performantes des lampes sodium haute pression (SHP) et iodures métalliques (IM)
	Lampes à vapeur de mercure haute pression, appelées aussi ballons fluorescents (BF)
Avril 2015	Lampes mixtes
	Lampes SHP de substitution aux lampes à vapeur de mercure
	Lampes fluocompactes à 2 broches (lampes à starter intégré)
Avril 2017	Lampes IM ≤ 405W les moins performantes

Nota bene : les ballasts pour lampes à décharge présentant une efficacité énergétique médiocre sont exclus à partir d'avril 2017.

Si la réglementation européenne n'a pas encore analysé l'ensemble des impacts de l'éclairage artificiel, la résolution 1776 du Parlement du Conseil de l'Europe (2010) déclare que **la pollution lumineuse touchant la faune et la flore est l'une des plus grandes menaces sur la biodiversité urbaine en ayant de plus des effets délétères sur le métabolisme humain**. Dans le cadre de la convention

européenne des droits de l'homme à vivre dans un environnement de qualité, elle invite les états membres à introduire des seuils d'exposition à la lumière artificielle pour préserver la santé, de repenser l'éclairage de toutes les communes avec une participation de scientifiques et d'associations de protection de l'environnement et du ciel en définissant des niveaux d'éclairage maximum pour la voirie et le ciel, et de réduire ou même supprimer la pollution lumineuse de l'éclairage public en utilisant des lampes au sodium basse pression avec une bonne orientation de la lumière et des détecteurs de présence.

1.2.3.4. LES NORMES PRIVÉES

Dans sa communication de juin 2011, la Commission européenne⁽¹⁷⁾ rappelle que « les normes sont des documents facultatifs ». La Commission indique que **« la grande majorité des normes européennes sont encore élaborées sur initiative de l'industrie, ce qui montre que ces instruments répondent principalement aux besoins des entreprises et aux intérêts du secteur privé »**.

Elle ajoute que « traditionnellement, les normes étaient élaborées dans un souci de coordination technique ». « Il est encourageant d'utiliser des instruments d'analyse du cycle de vie élaborés au niveau de l'Union. Les normes seront également essentielles pour développer de nouveaux marchés destinés à des produits et des services plus respectueux de l'environnement et pour faciliter l'accès de nouveaux acteurs ». Elle affirme donc que **« à l'avenir, il sera nécessaire de tenir compte de facteurs environnementaux lorsqu'il s'agira d'élaborer des normes dans d'autres domaines »**. Cette démarche est appelée « intégration des exigences environnementales ». La Commission reconnaît les progrès accomplis par les Organismes Européens de Normalisation (OEN) tant dans l'aide apportée aux rédacteurs de normes en vue de répertorier et de comprendre les incidences environnementales de base, que lorsqu'il s'agit de déterminer s'il est possible de tenir compte de ces incidences lors de l'élaboration d'une norme. **« Néanmoins, les efforts consentis pour aborder efficacement les questions environnementales au sein des Organismes Nationaux de Normalisation (ONN) restent maigres. Par conséquent, l'intégration des exigences environnementales devrait rester hautement prioritaire pour les OEN et ONN »**.

En France, 1 % seulement des normes sont d'application obligatoire. La vision traduite par ces normes n'a donc aucun caractère réglementaire pour les élus.

⁽¹⁷⁾ COM(2011) 311



1.2.3.5. LA NORME EUROPÉENNE EN 13201

La norme EN 13201 est une norme européenne parue en 2003 relative à la performance photométrique de l'éclairage extérieur, d'application non obligatoire.

Créée à la demande de professionnels du secteur de l'éclairage, elle prescrit des valeurs photométriques minimales à maintenir et la prise en compte des enjeux environnementaux n'y est pas encouragée, excepté sous l'angle de l'efficacité énergétique à travers l'introduction d'une cinquième partie dans la version révisée publiée fin 2015. Le préambule de la norme indique que le Maître d'ouvrage peut décider de ne pas éclairer.

La norme comprend quatre documents :

- RT 13201-1 Éclairage public – Rapport technique de sélection des classes d'éclairage ;
- EN 13201-2 Éclairage public – Exigence des performances ;
- EN 13201-3 Éclairage public – Calcul des performances ;
- EN 13201-4 Éclairage public – Méthode de mesures des performances photométriques.
- EN 13201-5 Éclairage public – Indicateurs de performances énergétiques.

1.2.3.6. LA NORME EUROPÉENNE EN 12193

La norme EN 12193 précise les recommandations pour des installations d'éclairage des salles et terrains de sports. Soixante sports sont concernés dont certains se pratiquent ou peuvent se pratiquer à l'extérieur comme le rugby, le football, l'athlétisme ou encore le tennis.

Bien que non obligatoire, certaines fédérations exigent son utilisation. On peut noter que le rapport Lambert-Boulard portant sur la lutte contre l'inflation normative indiquait en 2013 que « les puissances exigées [par les fédérations sportives] sont définies sans prise en compte des préoccupations d'économie d'énergie et de développement durable ».

1.2.3.7. LA NORME FRANÇAISE EXPÉRIMENTALE X90-013 « NUISANCES LUMINEUSES EXTÉRIEURES »

Elle se propose en particulier de définir une méthode devant permettre de comparer différentes solutions d'éclairage et de sélectionner celles qui minimiseraient les nuisances nocturnes dues à la lumière. Mais à ce stade, comme nombre des normes d'éclairage européennes ou françaises, cette norme ne prend pas en compte les effets sur le vivant et la biodiversité, des installations d'éclairage. Elle ne réalise qu'un bilan global à la source de la lumière perdue directe, ou par réflexion sur le sol, visible par les humains avec un œil adapté en vision de jour, sans analyser de manière précise les directions d'émission de la lumière et ses conséquences sur l'environnement.



La lumière
et le vivant

2 La lumière et le vivant

La rotation de la terre autour du soleil, la rotation de la terre autour de son axe incliné et la rotation de la lune autour de la terre créent pour tout être vivant des rythmes journaliers, mensuels et saisonniers, au sein desquels la vie des différentes espèces et écosystèmes s'est organisée. La lumière joue un rôle prépondérant dans leurs rythmes biologiques circadiens et infradiens, dont elle est un puissant synchronisateur.

2.1 La lumière, facteur majeur de la synchronisation biologique

Un rythme biologique peut se définir comme la variation périodique ou cyclique d'une fonction particulière d'un être vivant. Ce rythme peut être d'ordre physiologique (battement cardiaque, activité électrique cérébrale), biochimique (synthèse moléculaire, hormonale), comportemental (sommeil, migration, prédation) (Bécamel, ND).

Chez les mammifères, la structure temporelle est rythmée suivant différentes périodes :

- les rythmes ultradiens (période inférieure à 20h) ;
- les rythmes circadiens (autour de 24h, +/- 4h, chez l'humain : 24,2 h) ;
- les rythmes infradiens (supérieurs à 28h, comme le cycle lunaire et les saisons).

Au cours de ces différentes phases, les changements de luminosité régulent l'activité des différentes espèces et modulent leurs rythmes biologiques. Les rythmes circadiens sont observés chez tous les animaux. Ces rythmes sont synchronisés par une horloge. Cette horloge régule le sommeil, les rythmes hormonaux ou encore la température par exemple.

La lumière est le facteur le plus puissant de synchronisation.

Les études réalisées au cours des 30 dernières années ont montré que la lumière était le synchroniseur le plus puissant chez l'homme, nettement supérieur à celui des synchroniseurs socioprofessionnels. (Etude INSV-ANPCEN – MEDDE, 2012).

L'alternance lumière-obscurité permet à l'organisme de se mettre en phase avec son environnement (Claustrat, 2009). Elle fait partie des « agents donneurs de temps »

(aussi appelé *Zeitgeber*) au même titre que les alternances veille-sommeil, chaud-froid, et l'alternance des saisons (Touitou 1998 dans Inserm, ND). Les cycles journaliers et saisonniers fournissent des signaux qui permettent d'anticiper les changements réguliers de l'environnement comme la température et l'humidité (Gaston et al, 2011).

La présence de lumière artificielle pendant les phases d'obscurité vient modifier le rythme veille-sommeil et est capable de modifier les rythmes biologiques (Billiard et coll., 1996 ; Spiegel et coll., 1999 dans Inserm, ND). La lumière est ainsi capable d'agir sur les rythmes circadiens en impactant les sécrétions de deux hormones : la mélatonine (hormone ubiquitaire présente dans le monde animal et végétal) et le cortisol (que l'on retrouve chez les mammifères et les téléostéens⁽¹⁸⁾).

Les effets de la lumière sur la production de ces hormones sont dépendants de plusieurs facteurs :

- l'intensité de l'éclairement ;
- la durée d'exposition ;
- l'heure d'exposition ;
- le spectre de la lumière ;
- l'historique lumineux (importance du gradient d'exposition)⁽¹⁹⁾.

Ainsi, on peut considérer chez les êtres vivants une organisation générale impliquant une horloge centrale contrôlant les rythmes circadiens et assurant la synchronisation d'horloges ou oscillateurs périphériques par voie humorale (rôle de la mélatonine, du cortisol, de la température) et par voie nerveuse.

Une exposition inappropriée à la lumière (insuffisance d'exposition diurne et/ou exposition nocturne) peut modifier l'organisation temporelle de l'ensemble des phénomènes physiologiques, contribuant à une désynchronisation interne. Cela pourrait contribuer à une altération de la santé physique et/ou mentale de l'homme et de façon plus générale à des perturbations rythmiques chez les êtres vivants.

⁽¹⁸⁾ Il est possible que cette hormone soit sécrétée chez d'autres espèces.

⁽¹⁹⁾ Un individu exposé à une forte luminosité durant la journée, sera moins sensible à un niveau de luminosité moindre en soirée, qu'une personne ayant été exposée à ce même niveau d'intensité lumineuse tout au long de la journée. Il y a ainsi une importance du gradient d'intensité.

L'hypothèse cancérogène du travail posté pour les humains repose sur la désynchronisation du système circadien, conséquence d'un rythme lumière obscurité inadapté au cours des 24 heures. **Le Centre international de Recherche sur le Cancer de l'OMS à Lyon (CIRC) en 2011 a d'ailleurs classé ce facteur au niveau « groupe 2a », le niveau le plus proche de l'évidence dans son échelle d'appréciation.** (Etude INSV-ANPCEN – Medde, 2012).

2.1.1 Le système circadien chez les mammifères

Chez les mammifères, l'horloge biologique est située dans le cerveau au niveau des noyaux suprachiasmatiques (NSC) de l'hypothalamus. Les cellules ganglionnaires à mélanopsine situées dans la rétine détectent la lumière et transmettent un message non visuel à cette horloge. Ces cellules rétinienne, sont particulièrement sensibles à la lumière bleue.

2.1.1.1. LA MÉLATONINE

La mélatonine (aussi appelée « hormone du sommeil ») est sécrétée en quantité importante durant les périodes d'obscurité. Elle donne le signal de se mettre en veille (espèces diurnes) ou alors d'être actif (espèces nocturnes). Chez les espèces diurnes, à la nuit tombante, l'augmentation du niveau de mélatonine favorise la chute nocturne de la température interne, et la survenue du sommeil profond. (Etude INSV-ANPCEN – Medde, 2012).

Chez les mammifères, la transmission du message lumineux s'effectue d'une façon linéaire unidirectionnelle, de la rétine à la glande pinéale en passant par le noyau suprachiasmatique (Figure 8). C'est cette glande pinéale (aussi nommée épiphyse) qui sécrète la mélatonine.

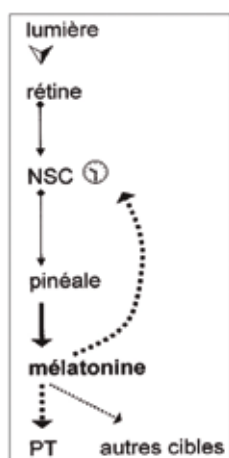


Figure 8 : Mélatonine et organisation circadienne chez les mammifères

(Falcón et al., 2007)

Chez les mammifères, la photopériode contrôle la sécrétion de mélatonine par la glande pinéale via une voie linéaire unidirectionnelle passant par la rétine et les horloges circadiennes des noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus (NSC) (flèches minces). Les NSC et la pars tuberalis (PT) de l'adénohypophyse [lobe antérieur de l'hypophyse composé de cellules endocriniennes] constituent les cibles majeures de l'hormone (flèches pointillées).

La perturbation du cycle circadien influe ainsi sur la production d'hormones comme la mélatonine. Des études ont montré que cette perturbation pouvait contribuer à l'augmentation du risque de cancer chez les travailleurs qui travaillent selon le rythme des trois-huit (Stevens, 2009; Megdal et al., 2005; Reiter et al., 2011) Chez l'être humain, des altérations de la mémoire, du sommeil, de la régulation de la température, mais aussi des troubles neurocognitifs, immunologiques et cardiovasculaires ont également pu être observés (Najjar et al., 2014)

Chez le rat, une étude de Dauchy et al. (1997) met en avant qu'une « contamination lumineuse » de seulement 0,2 lux lors d'une phase nocturne naturelle inhibe la sécrétion de mélatonine, ce qui accroît le risque de développement de tumeurs.

Ces observations laissent penser que des impacts similaires peuvent être rencontrés chez les autres groupes d'espèces.

2.1.1.2. LE CORTISOL

Outre l'inhibition de la sécrétion de mélatonine, l'exposition prolongée à une lumière relativement intense peut perturber la sécrétion du cortisol. Le cortisol a pour rôle de réguler le métabolisme des glucides, lipides, protides, des ions ou encore de l'eau. Tout comme la mélatonine, cette hormone, élaborée au niveau de la glande corticosurrénale chez l'être humain, est une hormone régulatrice du cycle circadien. A la différence de la mélatonine qui est sécrétée uniquement la nuit, le cortisol est sécrété en permanence. La production de cette dernière est en opposition de phase avec celle de la mélatonine (minimale en première partie de nuit et maximale tôt le matin).

Selon l'heure d'exposition, la lumière artificielle peut potentiellement perturber le rythme circadien de cortisol en augmentant ou en diminuant les quantités sécrétées. Jung et al. (2010), montrent qu'une exposition à une lumière intense (environ 10 000 lux dans leur étude), juste après le coucher du soleil ou juste avant le lever du soleil, réduit le niveau de cortisol sécrété chez les êtres humains. De faibles niveaux de luminosité (environ 3 lux dans leur étude), quant à eux, auraient peu d'effets⁽²⁰⁾. Les perturbations de ce cycle sont associées chez l'être humain à de nombreuses pathologies comme la polyarthrite rhumatoïde, l'alcoolisme ou la dépression. Elles peuvent aussi être à l'origine de troubles du sommeil ou encore favoriser le vieillissement (Louiset E., 2009).

⁽²⁰⁾ La question de la perception des intensités lumineuses étant toute relative suivant les espèces considérées (cf. partie 2), il est possible que de faibles niveaux d'intensité lumineuse, tels que perçus par l'humain, puissent avoir des effets bien plus importants chez d'autres espèces.

2.1.2 Le système circadien chez les autres vertébrés

Chez les autres vertébrés l'organisation circadienne et le système de sécrétions de la mélatonine sont différents. La sécrétion de mélatonine ne s'effectue pas par une voie linéaire unidirectionnelle. La mélatonine est sécrétée à la fois par la glande pinéale et par la rétine.

2.1.2.1. LA RÉTINE

La rétine serait impliquée de deux façons dans la production de mélatonine (Falcón et al, 2009) :

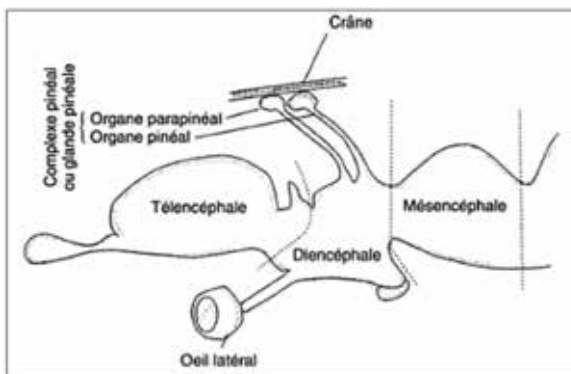
- en contrôlant la sécrétion de la glande pinéale ;
- en produisant directement cette hormone.

Cette sécrétion rétinienne est principalement observée la nuit chez les vertébrés. Cependant, chez certains poissons des pics de production diurnes ont pu être observés. Cette sécrétion hormonale peut aussi varier à travers les saisons (Falcón et al, 2009; Falcón et al, 2011).

2.1.2.2. LA GLANDE PINÉALE

Chez nombre de vertébrés comme les lamproies, les poissons, les amphibiens, les reptiles ou encore les oiseaux, la glande pinéale est photosensible (Mano et al., 2007).

Figure 9 : Localisation de la glande pinéale chez une lamproie (dans Tanzarella, 2005, modifié d'après Beaumont et Cassier, 1994)



Chez les poissons, la glande pinéale est située juste sous la boîte crânienne qui est légèrement translucide, ce qui permet de détecter les niveaux de luminosité. On parle ainsi parfois de « troisième œil ». On retrouve un système équivalent chez la lamproie⁽²¹⁾ marine (*Petromyzon sp.*)

⁽²¹⁾ Vertébré primitif sans mâchoire.

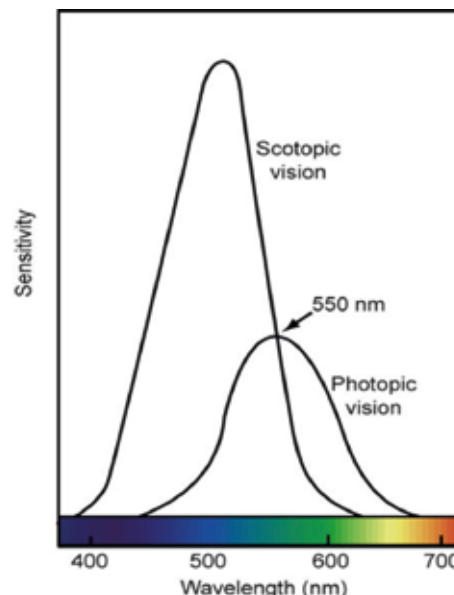
qui possède un complexe pinéal constitué par un organe parapinéale et un organe pinéal (cf. Figure 9). Bien que situé au niveau du crâne et donc recouvert par l'épiderme ce complexe est sensible à la lumière car « il contient des cellules photoréceptrices pinéales, ou transducteurs, homologues des cellules photoréceptrices de la rétine » (Tanzarella, 2005).

Chez certains têtards de batraciens, on trouve également, juste sous le crâne, un œil dit « médian » provenant d'une émanation postérieure de l'épiphysse (Tanzarella, 2005).

2.2 Une perception visuelle de la lumière différente selon les espèces

Chez les humains, on distingue la vision photopique (vision diurne au-delà de 3 cd/m²) de la vision scotopique (vision nocturne en deçà de 0,001 cd/m²). La plage d'adaptation entre ces deux visions est appelée la vision mésopique.

Figure 10 : Vision photopique et scotopique chez l'être humain (© Sound and Vision, 2015)



L'être humain dispose de capacités visuelles qui lui sont propres. Il ne perçoit qu'une partie de l'ensemble du spectre lumineux, le rayonnement dit visible (400 – 700 nm, cf. partie 1.2.), et sa vision est capable d'opérer sous 10 000 millions niveaux d'intensité différents (Barbur et al., 2010).

Dans l'obscurité et au bout d'un temps d'adaptation de 20 minutes, son œil est alors sensible à des intensités lumineuses beaucoup plus faibles qu'en journée, sa pupille étant dilatée et les cellules photoréceptrices de la rétine mobilisées pour la vision scotopique (les bâtonnets) étant plus sensibles d'un facteur 10 000 que celles mobilisées pour la vision photopique (les cônes). Cependant, l'acuité visuelle se trouve réduite en vision scotopique, les bâtonnets étant distribués hors de la fovea (partie centrale de la rétine). D'autre part, à la différence des cônes qui sont capables de détecter trois types de radiation dans les régions bleu, vert et rouge du spectre, les bâtonnets ne permettent pas à l'être humain de distinguer les couleurs en vision scotopique, expliquant par exemple le dicton « la nuit, tous les chats sont gris ».

Bien que certaines autres espèces (chez les mammifères notamment) puissent partager des capacités visuelles proches des êtres humains, elles ne sont pas identiques et peuvent souvent être bien différentes.

Si certaines espèces peuvent partager des capacités visuelles proches des êtres humains, elles sont souvent bien différentes.

2.2.1 Les vertébrés

Chez les vertébrés, ce sont les photorécepteurs présents dans la rétine qui réagissent aux fluctuations de la lumière et permettent la perception visuelle de leur environnement. Ces photorécepteurs ont des sensibilités différentes suivant les espèces, si bien que les notions de visions photopique et scotopique sont relatives à chaque espèce. Chez les mammifères, les cônes sensibles à la couleur ne sont fonctionnels qu'à partir d'un seuil de luminosité qui varie selon les espèces. Chez les poissons, ces photorécepteurs répondent aux fluctuations des intensités lumineuses en changeant de position à l'intérieur de la rétine (mouvement rétino-moteur).

Nombre d'espèces ont une très bonne vision la nuit, à l'image par exemple du chat dont la pupille « fendue » est capable de beaucoup se dilater et dont les yeux sont dotés d'une membrane réfléchissante située derrière la rétine (le *tapetum lucidum*). Les animaux nocturnes comme les chouettes et les hiboux possèdent une pupille

ronde et large, mais aussi extrêmement dilatée ce qui leur permet de capter la moindre luminosité lorsqu'il fait nuit. A l'inverse, les aigles dont les yeux sont adaptés pour voir à grande distance durant la journée, ne sont pas du tout adaptés à l'obscurité. Il y a dix fois plus de bâtonnets que de cônes dans la fovea de la rétine des mammifères nocturnes que dans celle des êtres humains, leurs cônes se situant majoritairement dans cette partie de la rétine (Roots, 2006).

2.2.1.1. LES SENSIBILITÉS SPECTRALES

La plupart des vertébrés comme les poissons, les reptiles et les oiseaux sont tétrachromates c'est-à-dire que les photorécepteurs présents dans leur rétine sont sensibles à quatre types de longueurs d'onde, ce qui leur permet de percevoir quatre couleurs fondamentales. Les primates et certains marsupiaux sont trichromates (sensibles à trois types de longueurs d'ondes), alors que la majorité des mammifères sont dichromates (sensibles à deux types de longueurs d'ondes). Les cônes de la rétine des primates sont sensibles au bleu, au vert et au rouge (Map of Life, 2014).

Les sensibilités spectrales sont donc bien différentes suivant les espèces considérées. Par exemple, à la différence de l'humain, un certain nombre d'espèces sont particulièrement sensibles aux

UV. C'est le cas des oiseaux car leurs lentilles et cornées sont transparentes à ces basses longueurs d'ondes (Cutchill et al., 2000). Cette vision des UV est relativement bien développée dans le monde animal puisque l'on retrouve des espèces « douées » de cette sensibilité chez les reptiles, les mammifères ou encore les poissons (Jacobs dans Cutchill et al., 2000 ; Losey et al., 2005).

D'autre part, certains animaux sont capables de détecter les rayonnements électromagnétiques situés dans l'infrarouge et « (d')élaborer une image mentale de l'objet perçu » (Tanzarella, 2005).

2.2.1.2. L'INTENSITÉ LUMINEUSE

Comme précédemment évoqué, alors que chez les mammifères les niveaux de luminosité sont détectés par la rétine, chez les autres vertébrés, les niveaux de luminosité peuvent à la fois être détectés par la rétine



© filipefrazao

mais également par un « troisième œil » ou un « œil médian » photosensible (cf. partie 2.1.). Les niveaux de luminosité utilisés en éclairage extérieur sont dédiés à la vision humaine photopique. Or, une part non négligeable d'espèces animales est capable de voir et donc d'évoluer sous des niveaux d'éclairement bien inférieurs à ceux nécessaires aux êtres humains (Gaston et al, 2013). Elles peuvent donc être gênées et éblouies suivant l'intensité et le contenu spectral de la lumière conçue de manière exclusivement anthropique.

Par exemple, la présence de lumière avec un niveau d'éclairement de seulement 10^{-7} lux accroît la capacité de détection des proies chez le saumon la nuit (Metcalf et al., 1997, dans Gaston et al., 2013). De même, l'*Hyla Squirrela* (amphibien) est capable de s'orienter et de chasser sous des niveaux d'éclairement de 10^{-5} lux alors qu'elle arrête de chasser au-dessus de 10^{-3} lux (Buchanan, 1998, dans Longcore et Rich, 2004). En comparaison, la pleine lune fournit un éclairage au sol de 0,1 à 0,2 lux alors qu'une rue est en moyenne éclairée autour de 10 lux (voir Tableau 3, p 10) avec des niveaux sous mâts souvent supérieurs à 30 lux ou plus.

2.2.1.3. LE PHÉNOMÈNE D'ÉBLOUISSEMENT

Chez les mammifères, la quantité de lumière reçue peut être ajustée dans une certaine mesure par la modification de la taille de la pupille de l'œil. Lorsqu'il fait sombre la pupille de l'œil se dilate afin de pouvoir capter le maximum de signaux lumineux. Le passage soudain d'une zone sombre à laquelle l'œil s'est adapté à une zone illuminée par un éclairage artificiel provoque l'intrusion d'une grande quantité de lumière dans la pupille dilatée ce qui peut engendrer un phénomène d'éblouissement voire de paralysie temporaire (Buchanan, 2006).

Chez les poissons et certains oiseaux la pupille ne peut se dilater. L'adaptation s'effectue grâce à un mouvement rétinomoteur des cônes et des bâtonnets et demande un certain temps d'adaptation.

2.2.2 Les invertébrés

Les invertébrés inférieurs ne possèdent pas vraiment d'œil. La lumière est perçue grâce à des cellules qui peuvent être situées sur la peau (comme chez les mollusques ou les larves d'insectes) ou au fond de petites cupules (comme chez les turbellariés⁽²²⁾ et les méduses).

Chez les invertébrés dont la vision est plus perfectionnée, l'organisation est différente. Les niveaux de luminosité sont détectés par les ocelles qui sont considérés comme des yeux simples alors que la « vision » est procurée par les yeux dits composés⁽²³⁾.

En résumé, chaque espèce possède ses propres capacités visuelles, avec une sensibilité plus ou moins grande aux différentes intensités lumineuses ainsi qu'aux différentes longueurs d'ondes. Les interactions entre les intensités lumineuses et la composition des bandes spectrales émises par les différentes sources lumineuses artificielles peuvent perturber la perception visuelle des animaux. Leur vision est réduite ou améliorée, engendrant, de fait, des perturbations dans leurs activités et plus globalement dans les interactions internes à l'écosystème considéré (Gaston et al., 2013).

⁽²²⁾ Classe de vers plats dont le corps est entièrement recouvert de cils vibratiles servant à la locomotion.

⁽²³⁾ Ensemble de photorécepteurs sensibles à la lumière.



Eclairage artificiel
et espèces : état de
connaissances

3 Eclairage artificiel et espèces : état de connaissances

La multiplication de l'utilisation en extérieur de la lumière artificielle la nuit depuis un peu plus de 100 ans, constitue un bouleversement majeur récent. Le grignotement des périodes naturelles d'obscurité, par la lumière artificielle, peut perturber le fonctionnement naturel des organismes, qui se sont construits au cours de milliards d'années sur l'alternance naturelle entre le jour et la nuit. Ainsi l'exposition non-naturelle à la lumière peut venir perturber la synchronisation biologique, et les capacités visuelles chez les humains comme chez l'ensemble des espèces. Cette partie propose une synthèse d'impacts répertoriés de l'éclairage artificiel par groupe d'espèces.

Dans le cadre de cette publication, le choix a été fait de ne se focaliser que sur les impacts de la lumière sur la faune afin de conserver une trame cohérente. Les impacts de la lumière artificielle sur la flore mériteront une publication dédiée. En effet, le fonctionnement du métabolisme et le développement des plantes sont fortement conditionnés par l'alternance jour-nuit. Plusieurs types de photorécepteurs ont pu être identifiés chez les plantes. Ces photorécepteurs sont particulièrement sensibles aux basses (UV, Bleu) et grandes (rouge et proche infrarouge) longueurs d'ondes. Briggs (2002), identifie **plusieurs processus directement affectés par la lumière et donc pouvant être potentiellement perturbés par l'éclairage artificiel : la germination, la croissance, l'expansion des feuilles, la floraison, le développement des fruits et la sénescence.** Par ailleurs, les plantes sont, entre autres, pollinisées par les insectes. Or, les insectes pollinisateurs nocturnes majoritairement représentés par les lépidoptères pourraient être fortement impactés par la pollution lumineuse. Cette problématique devrait être mieux étudiée et prise en compte (McGregor et al. 2014) pour en mesurer les impacts.

3.1 Les poissons

L'éclairage artificiel est fortement présent sur les zones côtières et autour des points d'eau. Dès lors, on peut aisément considérer que les sources lumineuses qui se situent au bord des rivières, des lacs, des mares, ou encore sur et sous les ponts, puissent fortement perturber le fonctionnement de ces écosystèmes et de leurs espèces. De fait, la pollution lumineuse constitue un obstacle et une perturbation supplémentaires venant impacter les réservoirs de biodiversité et les continuités écologiques constituées par les cours d'eau. Comme évoqué dans la première partie, les activités des poissons comme celles des autres taxons, sont fortement régulées par la lumière présente dans leur environnement. Ainsi, suivant la phototaxie de l'espèce considérée, les périodes d'activité seront différentes. Il n'est pas aisé de pouvoir faire émerger une typologie comportementale exhaustive. Néanmoins, chez les téléostéens (qui représentent 96 % des espèces de poissons vivantes référencées), il est admis que des comportements aussi importants que l'alimentation, les migrations, la reproduction, le fait de se déplacer ou non en banc, la couleur de la peau ou encore la consommation d'oxygène sont directement liés aux intensités lumineuses (Nightingale et al, 2006 ; Falcón et al, 2011). On peut préciser que « les processus à fluctuations journalières et/ou circadiennes impliquant l'organe pinéal et la mélatonine concernent l'activité locomotrice (dont la migration verticale et la formation de bancs), la prise alimentaire, l'état veille/sommeil (sédation), la préférence thermique, la pigmentation de la peau et des métabolismes (...) » (Falcon et al. 2009). Cette production de mélatonine est extrêmement sensible aux longueurs d'ondes bleues et vertes ce qui peut en perturber la sécrétion (Max et Menaker, 1992 ; Bayarri et al., 2002). De faibles niveaux d'éclairement sont également suffisants pour décaler, voire inhiber cette sécrétion hormonale. Brüning et al. (2014) montrent que celle-ci est inhibée chez la perche commune pour un éclairement d'à peine 1 lux, ce qui, selon eux, est un niveau d'éclairement assez commun dans les plans d'eau urbains.

D'autre part, les relations qu'entretiennent les différentes espèces de poissons avec la lumière varient certes entre les espèces, mais peuvent également varier au cours de la vie de chaque espèce (Nightingale et al., 2006). Par exemple, Hoar (1951) observe qu'après leur passage de l'état de juvénile à celui de smolt, les saumons répondent plus fortement aux stimuli lumineux. Après qu'un flash lumineux leur ait été adressé, les smolts se mettent à l'abri plus longtemps que les juvéniles. Gigeux et De Billy (2013), prennent aussi pour exemple la truite qui « est lucifuge aux stades alevin et juvénile, diurne au stade adulte et plutôt crépusculaire au stade âgé ».

L'article publié en 2006 par Nightingale, Longcore et Simenstadt dans le livre de Rich et Longcore constitue une très bonne référence concernant l'impact de l'éclairage sur les poissons. Les auteurs y montrent notamment que les poissons d'eau douce (rivières et lacs) seraient plus sensibles au jaune et au rouge car les longueurs d'ondes correspondantes sont plus présentes dans ces eaux peu profondes. Les espèces marines qui évoluent dans des eaux plus profondes seraient quant à elles plus sensibles aux basses longueurs d'ondes (vert et bleu).

En effet, à l'exception des longueurs d'ondes situées dans le bleu, les longueurs d'ondes sont filtrées de manière décroissante par la colonne d'eau traversée⁽²⁴⁾ (voir figure 11 ci-dessous).

Dans les eaux relativement claires, les UV (inférieurs à 400 nm) sont présents jusqu'à au moins 100 m de profondeur. Or, le pic d'absorption des cônes de l'œil des téléostéens indique qu'ils pourraient avoir une forte sensibilité à ces basses longueurs d'ondes (Losey et al., 2005).

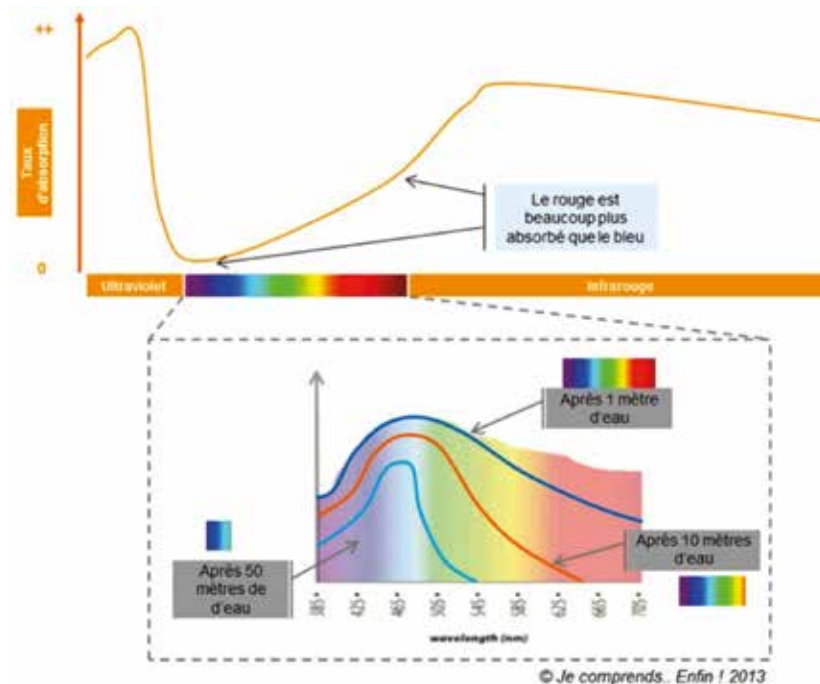
3.1.1 Lumière et comportement des poissons

3.1.1.1. LA RECHERCHE DE NOURRITURE, LES RELATIONS PROIES-PRÉDATEURS

De manière générale, les poissons auront tendance à chasser à partir d'un certain niveau de luminosité, ce qui leur permet de détecter plus facilement leurs proies, mais aussi leurs propres prédateurs. Cependant, encore une fois, les niveaux d'intensité lumineuse à partir desquels les différentes espèces vont commencer à chasser diffèrent

⁽²⁴⁾ Il est important également de noter que l'absorption de la lumière dépend aussi de la turbidité de l'eau, de la présence plus ou moins importante par exemple de phytoplancton et donc du type de milieu aquatique rencontré (torrent/rivière/fleuve/bassin alluvial)

Figure 11 : Spectre d'absorption de la molécule d'eau (Touly, 2013)



grandement. Ainsi, alors que certaines espèces nocturnes chassent à des niveaux d'illumination de 10^{-5} lux, d'autres espèces ne chassent qu'à partir d'un niveau d'éclairement supérieur ou égal à 0,1 lux (Blaxter, 1975).

L'introduction de la lumière artificielle pendant des périodes d'obscurité naturelle vient perturber l'organisation de ces milieux en introduisant un facteur supplémentaire auquel les espèces vont devoir s'adapter. Les relations traditionnelles proies-prédateurs s'en trouvent perturbées. Par exemple, la nuit, les poissons planctophages profitent des déplacements verticaux dans la colonne d'eau du zooplancton pour pouvoir se nourrir en surface, tout en bénéficiant d'une relative obscurité les protégeant ainsi des prédateurs diurnes. Pendant les périodes de pleine lune, ces prédateurs pourtant diurnes profitent de cet accroissement de luminosité pour rester actifs et chasser les poissons planctophages qui ne bénéficient plus de la protection fournie par l'obscurité. L'introduction de la lumière artificielle pourrait, de fait, accentuer la vulnérabilité de ces poissons planctophages au profit de leurs prédateurs diurnes (Hobson, 1965).

A l'inverse, certaines espèces montrent une phototaxie négative et pourraient souffrir de la présence de lumière artificielle. Les truites arc-en-ciel juvéniles sont ainsi moins actives en période de pleine lune ou lorsque celles-ci sont exposées à de la lumière artificielle (Contor et Griffith, 1995). On retrouve ce comportement lucifuge également chez les civelles qui migrent verticalement dans la colonne d'eau en fonction des intensités lumineuses (Bardonnnet et al., 2005). L'adaptation du comportement des individus aux fluctuations des intensités lumineuses peut être comprise comme la volonté de se protéger des prédateurs.

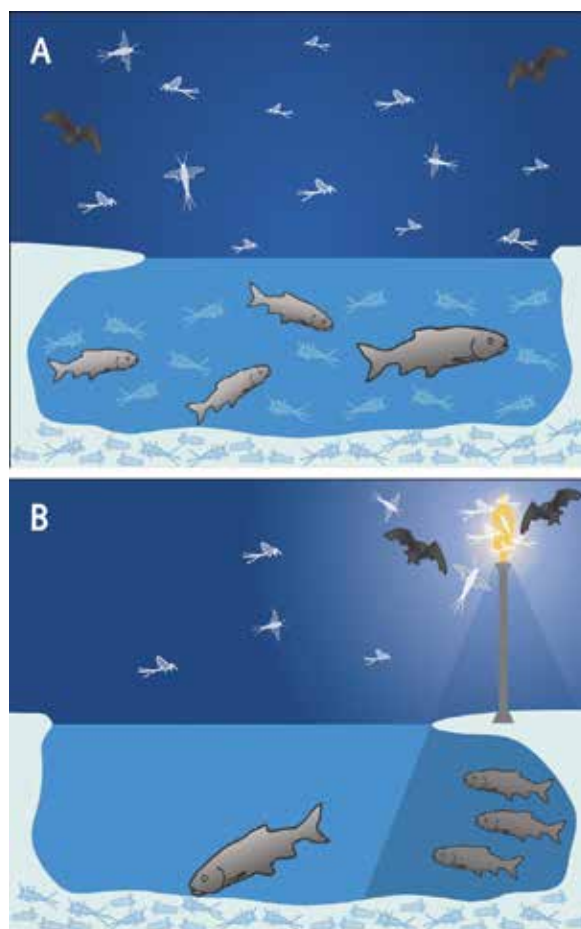
Traditionnellement les insectes des écosystèmes fluviaux viennent mourir dans les cours d'eau. Ce gisement de nourriture bénéficie à certains poissons. Or, comme on le verra un peu plus loin, les insectes, tout particulièrement ceux des écosystèmes fluviaux, sont fortement attirés par les sources lumineuses. (Perkin et al., 2013a). Ceux-ci viennent mourir à proximité de ces points lumineux constituant ainsi une source supplémentaire d'alimentation pour les espèces provenant d'autres habitats comme les chiroptères (Perkin et al., 2011).

La présence de l'éclairage artificiel à proximité des cours d'eau utilisés pour la migration des poissons accroît le risque de prédation provenant d'autres vertébrés comme les mammifères ou les oiseaux profitant d'un niveau de visibilité suffisant pour détecter leurs proies.

Figure 12 : Schéma du fonctionnement des écosystèmes fluviaux. (Perkin et al., 2011)

Sous des conditions naturelles d'éclairage nocturne (A) et le même système sous l'influence d'un éclairage artificiel (B).

On peut noter les effets induits par l'introduction d'un éclairage artificiel. En (B) les petits poissons cherchent désormais à se protéger. Il y a aussi une suppression de la dérive des invertébrés fluviaux⁽²⁵⁾, les insectes sont attirés vers la source d'éclairage artificielle, et les chauves-souris viennent désormais chasser à proximité de cette nouvelle source lumineuse.



Par ailleurs, certains poissons peuvent également développer de nouvelles attitudes dans leur recherche de nourriture, à l'image du saumon de l'Atlantique qui modifie son comportement en-dessous de 0,1 lux. Il se déplace ainsi vers des eaux moins mouvementées afin d'avoir plus de temps pour identifier ses proies, bien que celles-ci soient moins nombreuses dans de tels milieux (Perkin et al., 2011).

⁽²⁵⁾ Dispersion des larves d'invertébrés vivant dans les cours d'eau. Elles sont portées par le courant de l'eau des lieux où elles éclosent vers des sites où elles peuvent se développer.

En conséquence, le fonctionnement des écosystèmes peut être fortement perturbé et ceci de manière bien plus importante que ce que l'étude d'une seule espèce ou d'un seul taxon pourrait le montrer. Certaines espèces pourraient très bien s'accommoder de la présence de lumière artificielle car elles y trouveraient des conditions plus favorables pour rechercher leurs proies, à l'image des araignées qui tissent leur toile près des sources lumineuses. Néanmoins, les proies ont tendance à fuir ces sources lumineuses afin de se protéger de leurs prédateurs.

3.1.1.2. LES DÉPLACEMENTS EN BANCS ET LES MIGRATIONS

Le fait pour les poissons de se déplacer en banc est interprété comme un comportement visant à se protéger des prédateurs. Les recherches effectuées montrent que les poissons ont tendance à se disperser lorsque la luminosité diminue (Woodhead, 1966 dans Nightingale et al., 2006). Comme on a pu le laisser entendre précédemment, l'éclairage intensif des zones urbanisées à proximité des côtes augmenterait le risque de prédation et donc la vulnérabilité de certaines espèces, à la pêche par exemple, qui, de fait, pourraient se regrouper en bancs même la nuit.

3.1.1.3. LES MIGRATIONS

Lors de leurs migrations, les poissons utilisent le soleil comme source d'orientation. Les poissons migrateurs seraient capables de s'orienter en utilisant les changements de l'azimut du soleil (l'angle du soleil sur un plan horizontal) et/ou l'altitude (l'angle du soleil sur un plan vertical). Cependant, les signaux fournis par le soleil ne sont pas fiables car celui-ci peut être dissimulé par la couverture nuageuse ou d'autres éléments physiques et car les mesures d'angle varient à des rythmes journaliers et saisonniers. De fait, pour pouvoir s'orienter lors de leurs migrations, les poissons doivent faire appel à leur horloge et calendrier biologiques (Binder et al., 2011). Or, comme évoqué précédemment, l'exposition prolongée à la lumière artificielle au cours de périodes naturelles d'obscurité peut venir perturber cette horloge biologique.

Par ailleurs, en 2011, Perkin et al. ont publié un article portant sur l'influence de la lumière artificielle sur les écosystèmes des rivières. Cet article fait un point sur l'état des connaissances actuelles sur le sujet. Il rappelle notamment que l'exposition constante à la lumière peut être à l'origine de la réduction des capacités de smoltification (processus métabolique qui permet aux jeunes saumons, les smolts, de s'adapter à l'eau de mer) bien que les raisons exactes de cette perturbation ne soient pas encore déterminées.

En 2001, une étude de Tabor et al. a mis en évidence le fait que l'augmentation de l'intensité lumineuse pendant la nuit pouvait avoir des effets importants sur les petits saumons rouges. Les auteurs ont observé un retard dans les migrations et un déplacement des individus vers les rives éclairées et où le courant est faible. Lors des expériences, leurs migrations vers l'aval débutaient chaque nuit à des intensités inférieures à 1 lux. A l'inverse, lorsqu'ils étaient exposés à des lumières artificielles avec un niveau d'éclairage de 32 lux, les migrations étaient pratiquement totalement stoppées. Ce comportement peut être notamment lié au risque de prédation qui s'accroît lorsque le niveau de luminosité augmente. Ainsi Tabor et al. (2004), montrent un taux de migration des saumons rouges juvéniles encore moins élevé lorsque des prédateurs (des cottidés) étaient introduits dans le ruisseau artificiel éclairé de l'étude.

En 2012, une étude de Riley et al. menée sur un affluent de la rivière Itchen (Angleterre) a permis de mettre en évidence certaines perturbations que l'éclairage extérieur peut avoir sur la migration des smolts des saumons de l'Atlantique. En effet, leur étude montre que les smolts exposés aux éclairages artificiels de la rue entament leur migration (dévalaison) de façon aléatoire. Sous des conditions expérimentales proches des conditions naturelles, ces migrations se sont effectuées de façon très corrélées avec les heures de coucher du soleil.

L'impact de l'éclairage artificiel sur les comportements et la migration des poissons peut également être apprécié à travers les technologies utilisées pour attirer les poissons vers les passes à poissons des barrages ou tout simplement pour les repousser afin de leur éviter d'être aspirés à l'intérieur des tuyaux des centrales électriques (Nightingale et al., 2006). On peut ainsi noter que les effets stroboscopiques et les lampes allumées sur de très courtes durées seraient fortement répulsifs (Kokanee, 2005 ; Nightingale et al., 2006). En effet, chaque changement de luminosité implique une adaptation visuelle qui est plus ou moins longue selon les espèces. Pendant cette période d'adaptation, les individus concernés peuvent être incapables de s'orienter ou de se déplacer comme ils le feraient dans d'autres conditions. A l'inverse, les lampes à illumination constante permettraient une relative « adaptation » des espèces à ces nouvelles conditions. Cependant, il n'existe pas une seule combinaison de durée, d'intensité et de spectre capable d'attirer ou de repousser toutes les espèces de poissons (Nightingale et al., 2006). D'ailleurs, Gigueux et De Billy (2013) souligne que l'installation d'un éclairage artificiel sur les ouvrages hydrauliques empêche leur franchissement chez certaines espèces alors que chez d'autres ce franchissement s'effectue plus rapidement.

Ces différentes études font bien ressortir les obstacles potentiels que peuvent représenter les systèmes d'éclairage artificiel, mal réfléchis, placés à proximité des voies de migrations et des corridors écologiques.

3.1.2 Eclairage, pêche et aquaculture

A l'image des technologies utilisées sur les barrages, l'impact de l'éclairage sur les poissons est bien connu puisque celui-ci est utilisé dans le cadre d'activités économiques comme la pêche ou l'élevage.

3.1.2.1. LA PÊCHE

Il existe à la vente des lampes de couleur blanche ou verte pour la plupart et destinées à la pratique de la pêche. Pourtant, des études indiquent que certains poissons seraient attirés par la lumière artificielle (phototaxie positive) (Larinier et Boyer- Bernard, 1991), d'autres révèlent parfois un comportement lucifuge (phototaxie négative) (Nemeth et Anderson, 1992).

Dans le cadre de leur recherche visant à connaître l'impact de la lumière sur des espèces de poissons présentant un intérêt commercial, Marchesan et al. (2004) montrent que chaque espèce réagit différemment à la lumière, en fonction du spectre ou de l'intensité lumineuse.

Ainsi, le mulot cabot et la dorade royale réagissent « positivement » à la lumière en étant attirés par celle-ci de manière assez forte. Le mulot cabot apparaît être particulièrement attiré par les stimuli monochromatiques dans le violet et le bleu et à l'inverse repoussé par la lumière rouge. Le bar, lui, a exprimé un rejet des lumières bleues et vertes lorsque celles-ci étaient projetées en premier lors des expériences. De la même manière, la dorade a tendance à s'éloigner de toutes les lumières monochromatiques, et ce, indépendamment de la couleur. Ainsi, chaque espèce réagirait de manière différente à la lumière artificielle, suivant son intensité et sa/ses longueurs d'ondes. Ces réactions pourraient être liées à l'environnement dans lequel évoluent ces différentes espèces, leur mode de vie et leur façon de se nourrir.

Par exemple, le fait que le bar réagisse à la lumière blanche de basse intensité ainsi qu'aux courtes longueurs d'ondes indiquerait que c'est une espèce de type prédateur, avec une vision à tendance scotopique qui s'adapte mieux aux environnements très peu éclairés, avec une préférence pour les activités crépusculaires. Le mulot cabot aurait quant à lui un comportement beaucoup plus souple puisqu'il montre un attrait envers une gamme plus large de couleurs. De fait, ce comportement correspond bien à son activité de type diurne et à ses multiples sources d'alimentation (détritivore, mais se nourrissant aussi de plantes, d'algues et de zooplancton).



© Anne-Marie Ducroux

3.1.2.2. L'AQUACULTURE

Afin d'accroître le poids, d'accélérer la croissance des poissons d'élevage ou encore de jouer sur la coloration des poissons, l'éclairage artificiel est utilisé par les professionnels afin « d'optimiser » les photopériodes dans une optique commerciale.

Cette technique est particulièrement utilisée pour la croissance des saumons (Porter et al., 1999 dans Cornielsen, 2011). L'exposition du saumon atlantique à un éclairage artificiel 24h/24 en automne permet d'accroître significativement leur croissance arrivée à la fin mai (ACRDP, 2012).

Mustapha et al. (2012) ont mené une étude sur les poissons chats africains juvéniles (prédateurs nocturnes) afin de déterminer si la lumière pouvait avoir un effet sur la croissance de ces poissons. Ainsi, en utilisant trois photopériodes différentes (24 heures de noir total, 24h d'éclairage continu, et une alternance 12h de luminosité, 12h de noir total) ils montrent que la photopériode « 24 h de noir total » est celle qui permettrait la croissance la plus rapide des poissons. Cela serait lié à la suppression des déplacements des agressions et des facteurs de stress qui seraient plus prégnants lorsque l'environnement est éclairé, mais également à un meilleur ratio de conversion alimentaire. A l'inverse, l'alternance 12h de luminosité, 12h de noir total apparaît être le rythme le moins intéressant dans une optique de croissance rapide de ces poissons. Dans un environnement lumineux constant, les poissons s'adapteraient à ce nouvel environnement et changeraient leur manière de se nourrir.

3.2 Les crustacés

Peu de recherches ont été menées sur la relation qu'entretiennent les crustacés avec la lumière. Les principales études dans le domaine se sont concentrées sur le zooplancton.

En effet, le zooplancton possède la particularité de migrer verticalement. Cette migration s'effectue selon un rythme nyctéméral pour beaucoup d'espèces. Le fonctionnement exact de ce processus n'est aujourd'hui pas totalement compris (Darnis, 2013). Cependant, on sait qu'un certain nombre de facteurs biotiques rentrent en ligne de compte comme l'optimisation de l'environnement pour le métabolisme, l'évitement des prédateurs et la protection face à des facteurs nocifs tels que le rayonnement UV (Fortier et al, 2001, dans Darnis, 2013). Parmi les facteurs qui viennent réguler ces migrations verticales, on retrouve la lumière et plus particulièrement la lumière de la lune (Tarling et al, 1999). Une étude de Gliwicz (1986) menée sur le Lac Calahorra Bassa au Mozambique montre que dans les réservoirs d'eau douce le zooplancton se place de manière différente dans la colonne d'eau en fonction de la synchronisation entre le coucher du soleil et le « lever » de la lune (dans Tarling et al, 1999). Le zooplancton remonte vers les couches supérieures de la colonne d'eau lorsque la nuit est obscure et non perturbée par la lumière lunaire. En menant une étude sur le krill, Tarling et al. (1999) montrent que les comportements et la distribution des individus dans la colonne d'eau peuvent changer au cours de la semaine qui suit une pleine lune. Un nombre croissant d'animaux atteignent ainsi la surface puis redescendent en profondeur au fil des jours qui suivent. Une étude récente (Navarro-Barranco & Hughes 2015) montre que les amphipodes (petits crustacés vivant à la transition entre milieu marin et milieu d'eau douce) sont plus attirés, en nombre et composition, en présence de sources à LEDs que dans le cas de sources halogènes.

L'ampleur des migrations peut être extrêmement variable, de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Elles jouent un rôle important pour la séquestration du carbone mais représentent également un gisement de nourriture pour certaines espèces de poissons (Darnis, 2013). Le rôle de ces migrations dans les réseaux trophiques doit donc être souligné.

Les poissons peuvent profiter des moments où la pleine lune se lève tardivement pour se nourrir du zooplancton qui est remonté à la surface lorsque l'obscurité n'était pas troublée par la lune. Gliwicz (1986) nomme ce phénomène le « *lunar light trap* ». Un éclairage artificiel pourrait très bien favoriser ce phénomène (Nightingale et, 2006). On peut également penser qu'un éclairage constant pourrait réduire le processus de migration verticale. L'étude de Moore et al. (2000) menée sur un lac périurbain conclut ainsi que la pollution lumineuse urbaine réduit la migration verticale journalière de la daphnie à la fois en amplitude (2 m plus bas) et en magnitude (10 à 20 % d'individus présents) par rapport à un lac qui ne serait pas impacté par l'éclairage urbain.

3.3 Les insectes

Le phénomène d'attraction des insectes par des lumières artificielles est bien connu et a pu être observé par tous. Eisenbeis (2006) classe le comportement des insectes envers les sources lumineuses en trois grandes catégories d'effets :

- Effet de « *fixation* » ou de « *captivité* » : quand un insecte approche la zone d'attraction d'un point lumineux, différentes interactions sont possibles. Il peut voler directement droit vers la lampe chaude s'il n'y pas de vasque de protection, et mourir instantanément. Le plus souvent, les insectes orbitent autour de la lumière jusqu'à épuisement ou jusqu'à ce qu'ils soient capturés par un prédateur. D'autres, sont capables de quitter la zone illuminée pour aller se réfugier dans les zones sombres car ils sont éblouis ou aveuglés. Certains sont ensuite capables de revenir à proximité du point lumineux alors que les autres restent inactifs, ce qui les rend plus vulnérables au risque de prédation.

- L'effet « *crash barrier* » : ce phénomène correspond au fait que les insectes se retrouvent bloqués sur leur trajectoire par la barrière lumineuse constituée par les points lumineux présents au bord d'une route par exemple. Ils adoptent alors des comportements compris dans les effets de « fixation » ou de « captivité ».

- L'effet « *vacuum cleaner* » : les insectes sont comme aspirés de leur habitat vers les sources lumineuses.

Dans l'étude menée par Kolligs (2000) 99 % des insectes attirés étaient des moustiques, des papillons, des mouches et des coléoptères (dans Sibley, 2008). L'étude de Perkin et al (2013a) montre que les insectes aquatiques seraient plus vulnérables à la lumière artificielle que les insectes dits terrestres. Il y a proportionnellement plus d'insectes dans une zone éclairée proche d'un milieu aquatique que d'insectes terrestres. Ce phénomène pourrait être lié au fait que la lumière polarisée renvoie un signal favorable pour la ponte des œufs dans les environnements d'eau douce (Horvath et al. 2009 dans Perkin et al. 2013).

Eisenbeis et Hassel (2000) estiment à environ 150 le nombre d'insectes tués par lampadaire et par nuit d'été, ce qui représente plus d'un milliard d'insectes tués par nuit sur les 6,8 millions de réverbères présents en Allemagne (dans Eisenbeis, 2006). S'il l'on met ces chiffres en parallèle avec les 11 millions de points lumineux présents en France, on peut avancer que le nombre d'insectes tués est d'autant plus important sur notre territoire national. Jean-Philippe Sibley (2008) souligne que : « **cette hécatombe a des répercussions sur tout le réseau trophique qui dépend de ces espèces et sur les plantes, car de nombreux insectes nocturnes sont pollinisateurs ou phytophages** ». Si l'on s'appuie sur l'étude de Perkin et al. (2013a), on peut penser que ces répercussions sont d'autant plus importantes sur les milieux aquatiques.

Ces insectes sont impactés tout au long de leur développement, de l'état de larve à celui d'adulte. L'étude de Perkin et al. (2013b), menée en été, montre que l'éclairage



artificiel diminue la dérive larvaire des invertébrés, principalement chez les éphéméroptères⁽²⁶⁾. La réduction de la dérive des larves pourrait entraver le développement des espèces concernées, empêcher leur déploiement vers de nouveaux espaces et ainsi avoir un impact sur l'ensemble de l'écosystème (Bruce-White et Shardlow, 2011).

En ce qui concerne les préconisations en matière d'éclairage, Eisenbeis (2006) recommande l'usage de lampes à sodium basse pression (SBP) plutôt que les lampes au sodium haute pression et encore moins les lampes à vapeur de mercure. En effet, les études montrent que les SBP sont moins nuisibles pour l'entomofaune nocturne en attirant respectivement entre 2 et 4 fois moins d'insectes. Sur la même lignée, Franck (2006) recommande également l'utilisation des lampes à sodium basse pression.

Afin de réduire l'impact de l'éclairage artificiel sur la capacité de développement des papillons de nuit, Van Geffen et al. (2014) recommandent de privilégier les lampes avec un spectre situé dans les grandes longueurs d'ondes. Les stemmates (ocelles) des chenilles seraient en effet faiblement sensibles aux grandes longueurs d'ondes comme le rouge (Ichikawa et Hideki, 1982). Il a ainsi été observé que l'exposition aux basses longueurs d'ondes (vert et blanc) provoque une sortie des larves de leurs chrysalides plus

prématurée encore que lorsqu'elles sont exposées à une lumière rouge (Van Geffen et al., 2014). Chez les mâles, cette émergence prématurée se traduit par l'atteinte chez les chenilles d'une masse inférieure à ce qu'elle devrait être. Ceci pourrait réduire leur longévité, leur capacité à voler, ainsi que leur fertilité (Shirai, 1993, 1995 ; Carroll 1994 ; Tammaru et al., 1996 ; Inyengar et Eisner, 1999).

Selon Eisenbeis et Eick (2011), les LEDs attireraient moins d'insectes que les anciennes ampoules. Cependant, Davies et al. (2012) avancent au contraire que ces technologies dont le spectre lumineux est plus large pourraient aggraver encore davantage les effets des nuisances lumineuses. Récemment **Pawson et Bader (2014) ont fait ressortir dans leur étude que les pièges lumineux équipés de LEDs capturaient 48 % d'insectes en plus que les pièges équipés de lampes à sodium haute pression. Sur la base de ces résultats ils soulignent qu'il est urgent que des recherches collaboratives soient menées entre les écologistes et les ingénieurs en électricité.**

3.4 Les amphibiens

Le développement important de l'éclairage extérieur au cours des dernières décennies a entraîné une intrusion croissante de la pollution lumineuse au sein des habitats amphibiens (Cinzano et al, 2001 dans Buchanan, 2006). Or, les amphibiens, dont 21 % des espèces présentent en France métropolitaine sont menacées selon l'UICN, sont particulièrement sensibles aux intensités lumineuses et à leur fluctuation.

En effet, 90 % des espèces de cette classe sont totalement ou partiellement nocturnes. De fait, les amphibiens chassent dans cet environnement et sont également la proie d'autres espèces nocturnes.

Comme pour d'autres vertébrés, la production de mélatonine augmente pendant la nuit et diminue le jour (Wise et Buchanan, 2006). Une exposition prolongée à la lumière artificielle pendant les périodes d'obscurité naturelle risque donc d'affecter la synchronisation biologique des individus exposés.

3.4.1 Les anoures

Les anoures sont des amphibiens dont les larves sont aquatiques (têtard) et dont les adultes, qui ne possèdent pas de queue, peuvent vivre en dehors de l'eau (ex : les grenouilles et les crapauds).

De manière générale, les anoures ont une mobilité réduite due aussi bien à leur mode de locomotion qu'à leur dépendance à l'humidité. Ils sont en conséquence moins aptes que d'autres espèces à éviter les changements ou à s'y adapter (Buchanan, 2006).

⁽²⁶⁾ Ephéméroptères : Ordre d'insectes aux téguments (enveloppe externe) mous et à vol médiocre. Ils sont considérés comme des insectes primitifs.

Les zones éclairées ont tendance à attirer un nombre important d'individus en raison de leur abondance en proies et du fait que certaines espèces ont une phototaxie positive. De fait, le comportement naturel de ces espèces s'en trouve perturbé.

En 1993, Buchanan mène une étude sur les *Hyla chrysoscelis* en les exposant sous trois niveaux d'éclairage différents (0,001 lux, 3,8 lux et 12 lux) face à des proies vivantes. Il montre que les grenouilles ont besoin de plus de temps pour pouvoir détecter ou d'essayer de capturer ces proies après un accroissement rapide d'éclairage. Ainsi, cette étude a permis de mettre en avant les effets d'éblouissement et de paralysie temporaire que peuvent engendrer les changements brusques d'éclairage sur les capacités visuelles. Le phénomène d'éblouissement serait à l'origine de la mort de nombreux amphibiens écrasés par les véhicules (Buchanan, 2006).

L'éclairage artificiel perturbe donc la recherche de nourriture : les amphibiens ont ainsi tendance à retarder leur sortie, et le risque de prédation rend la chasse et les autres activités moins efficaces (Buchanan, 2006).

La pollution lumineuse pourrait également perturber la reproduction des amphibiens. Les mâles de Grenouille verte exposés à des lumières artificielles seraient moins vocaux et se déplaceraient plus fréquemment qu'ils ne le feraient de manière naturelle, influençant ainsi les accouplements et les dynamiques de population (Baker 2006).

Lorsqu'elles sont exposées à la lumière les femelles des Grenouilles Tungara (*Physalaemus pustulosus*), deviennent moins sélectives dans le choix de leur partenaire (Rand et al., 1997). Buchanan (2006) souligne néanmoins que ces résultats ne peuvent être généralisés à toutes les espèces. Il suggère également en 1994, que l'éclairage artificiel pourrait perturber le choix des partenaires ou la compétition entre les mâles au sein de l'espèce *Hyla squirella*. Les mâles ont en effet des bandes labiales et latérales plus jaunes que celles des femelles. L'exposition à des lumières au spectre restreint comme, les lampes à sodium basse pression, perturberait ce dimorphisme sexuel.

De façon générale, les migrations pré-nuptiales et post-nuptiales des amphibiens pourraient être désorientées par les longueurs d'ondes supérieures à 550 nm (Scetauroute, 2001). Il semble que cette affirmation soit surtout vraie pour les espèces possédant une vision plutôt photopique.

Empiriquement, les grenouilles exposées à des lumières bleues avec une intensité lumineuse supérieure à l'illumination ambiante montrent statistiquement une phototaxie positive (Buchanan, 2006).

Par ailleurs, l'éclairage artificiel pourrait impacter le développement des larves. Il a été montré que les larves de *Discoglossus pictus* se développent rapidement lorsque la scotophase (période d'obscurité) est longue. Cependant, il faut également noter que les larves élevées sous lumière constante ne montrent pas un développement plus rapide que celles élevées sous des conditions d'alternance plus naturelles (Gutierrez et al., 1984).

Les têtards utilisent également la luminosité ambiante afin de se diriger dans la colonne d'eau. En journée les têtards montent vers la surface pour profiter des eaux plus chaudes. La nuit ils redescendent vers les eaux plus profondes moins soumises aux changements de température. La lumière artificielle pourrait dès lors envoyer un signal contraire, indiquant aux têtards de rester proches de la surface même pendant la scotophase (Buchanan, 2006). Muntz (1966), montre que la sensibilité photopique maximale des têtards de *Bufo Bufo* et de *Rana esculenta* se trouve respectivement vers 560 nm et 620 nm.

3.4.2 Les urodèles

Les urodèles sont des amphibiens dotés de quatre membres, d'un corps allongé et d'une longue queue à l'état adulte (ex : les tritons et les salamandres).

Il est difficile de tirer des conclusions sur cet ordre car peu d'études ont été menées sur leur relation avec la lumière. Lorsqu'elles existent, ces études ne permettent pas de tirer d'affirmations certaines (Wise et Buchanan, 2006). Pourtant, ces espèces peuvent être potentiellement très affectées par la présence d'un éclairage artificiel car elles sont en grande partie crépusculaires ou nocturnes (Perry et al., 2008).

Les études menées sur les salamandres montrent globalement une phototaxie négative. Ce rejet de la lumière serait une fuite face à une situation à risque. Comme pour de nombreuses autres espèces, l'exposition à lumière accroît la vulnérabilité des salamandres face à leurs prédateurs. Cette phototaxie négative serait également liée à un comportement d'évitement des zones éclairées qui sont susceptibles de leur être moins favorables en termes de température et d'humidité (risque de dessèchement) (Wise et Buchanan, 2006). Le comportement des salamandres face à la lumière peut également évoluer au cours de leur vie, puisque les larves auraient une phototaxie positive (Wise et Buchanan, 2006).

3.5 Les reptiles

Bien que l'activité nocturne soit particulièrement développée chez les reptiles, il existe des différences suivant les espèces. Ainsi, alors que certains reptiles comme les geckos sont majoritairement nocturnes, d'autres comme les iguanes se trouvent être des espèces diurnes (Perry et Fisher, 2006). L'introduction de l'éclairage artificiel dans l'environnement des reptiles constitue une opportunité pour les espèces qui se nourrissent des invertébrés. En effet, on observe chez ces derniers une forte phototaxie positive. Les espèces nocturnes bénéficient donc d'une plus forte concentration de proies, alors que les espèces diurnes, elles, bénéficient quant à elle d'une meilleure luminosité et peuvent étendre leur activité en première partie de nuit. C'est ce que Garber (1978) appelle le « *night-light niche* » (dans Perry et Fisher, 2006).

Cependant, ce bénéfice est à relativiser puisque, comme chez les autres groupes d'espèces, l'éclairage artificiel redistribue les cartes dans la chaîne trophique. Le fait de chasser la nuit alors que la luminosité est élevée rend les individus plus vulnérables à leurs propres prédateurs et crée de nouvelles compétitions internes entre les espèces capables de s'adapter à ces changements de luminosité et les autres (Perry et Fisher, 2006).

L'impact de l'éclairage a particulièrement bien été observé chez les tortues. L'éclairage artificiel à proximité des plages réduit les zones de ponte. Les tortues ont en effet tendance à éviter les zones éclairées, même si ce n'est sans doute pas la première cause du rejet de ces zones (Salmon, 2006). En effet, l'éclairage artificiel est associé à l'aménagement des côtes. Or, celui-ci vient altérer d'autres caractéristiques, comme le profil des dunes et des plages (Salmon, 2006). La lumière artificielle vient perturber l'orientation des jeunes tortues. Dans des conditions naturelles, celles-ci rampent en direction de l'horizon plat et plus lumineux constitué par la mer éclairée par la lune et les étoiles (Salmon, 2006). En présence de lumières artificielles, les jeunes tortues « rampent dans la mauvaise direction et meurent victimes de prédateurs, et de la chaleur après le lever du jour » (Siblet, 2008).

3.6 Les oiseaux

Les effets de l'éclairage artificiel sur les oiseaux ont pu être particulièrement bien observés. On sait que la présence de lumière est fortement perturbante pour les différentes espèces. Les étoiles et la lune constituent les sources de lumière naturelles grâce auxquelles les oiseaux sont capables de s'orienter. Poot et al. (2008) soulignent qu'il est probable que les oiseaux migrateurs utilisent aussi bien les signaux visuels qu'un compas magnétique pour s'orienter. Cette orientation d'origine magnétique serait en partie dépendante des basses longueurs d'ondes (bleu et vert). Les recherches effectuées en laboratoire indiquent que les grandes longueurs d'ondes comme le rouge pourraient à l'inverse perturber ce compas magnétique.

Les oiseaux migrateurs sont ainsi particulièrement vulnérables à l'éclairage artificiel. Les halos lumineux des villes les privent des signaux lumineux célestes (les étoiles et la lune), les désorientant dans leurs migrations. Cette désorientation est constatée chez toutes les autres espèces d'oiseaux, et peut s'avérer fatale. Parfois, les individus peuvent tourner autour des fortes sources lumineuses jusqu'à épuisement. Il existe également un fort risque de collision entre les oiseaux eux-mêmes ou avec des structures tels que les tours de télévision, les tours illuminées, les plateformes pétrolières, les bateaux ou encore les voitures (Trapp 1998, dans Siblet 2008 ; De Molenaar et al., 2006). En 1886, Gastman dénombre environ 1000 oiseaux migrateurs morts autour de tours électriques dans le Decatur aux Etats-Unis en une seule soirée (dans Sidney et al., 2006). Au cours de la nuit du 8 au 9 octobre 2002,

un millier d'oiseaux sont morts lors de la première mise en service de l'éclairage du nouveau pont entre la Suède et le Danemark (ANPCEN, 2007).

Les collisions se produisent généralement davantage lors de mauvais temps, lors de la nouvelle lune et lors des périodes de migration. L'irruption soudaine d'une lumière vive provoque un éblouissement empêchant l'évitement des obstacles. Les désorientations provoquées par un éclairage artificiel peuvent fortement gêner les oiseaux et les juvéniles lors des périodes de nidification en les empêchant de pouvoir rejoindre leur nid. Les oisillons sont probablement plus sensibles à la lumière artificielle et sont désorientés plus facilement que les adultes (Montevicchi, 2006).

D'autre part, la pollution lumineuse peut avoir des conséquences physiologiques, comme le dérèglement des photopériodes, de la croissance et des cycles de reproduction (De Molenaar et al., 2006). Dominoni et al. (2013) font ressortir que la production de mélatonine était réduite la nuit chez les merles noirs exposés à une intensité lumineuse de 0,3 lux, avec pour conséquence principale un allongement de leur période d'activité journalière et pourrait être à l'origine de perturbations sur le rythme de reproduction.

L'utilisation de lampes dont les émissions spectrales se situent dans les basses longueurs d'ondes serait moins perturbante pour les oiseaux migrateurs. Cependant, les oiseaux ayant une forte sensibilité aux UV du fait de leur lentille et de leur cornée transparentes, il n'est pas recommandé d'avoir recours à des émissions dans des longueurs d'ondes inférieures à 400 nm (Spoelstra et Visser, 2014). Par ailleurs, comme on a pu le voir, les grandes longueurs ne sont pas non plus conseillées, car elles pourraient perturber les capacités d'orientation des oiseaux migrateurs. Enfin, les études menées à la Réunion sur les jeunes pétrels de Barau montrent que les basses longueurs d'ondes seraient plus perturbatrices pour ces espèces (Salamolard et al., 2001).

Certaines espèces comme les limicoles (petits échassiers) utilisent la présence de lumière artificielle pour augmenter leur périodes de nourrissage (Dwyer et al 2013) ce qui peut générer des compétitions inter-spécifiques.

3.7 Les mammifères

Chez les mammifères, les espèces les plus impactées sont les chiroptères (Siblet, 2008). Ce sont sur ces espèces que la majorité des études se sont penchées. Alors que certaines chauves-souris comme le Petit et le Grand Rhinolophe sont lucifuges et fuient les sources lumineuses, d'autres comme la Pipistrelle savent s'adapter à la présence de zones éclairées. Cette capacité d'adaptation leur confère un avantage certain dans la capture de leurs proies, qui viennent s'amasser autour des lampadaires. Les espèces lucifuges doivent alors chasser dans des zones plus éloignées, non touchées par la présence de lumières artificielles. Cette nouvelle organisation de la

chaîne trophique crée de nouvelles concurrences, voire une surprédation de la part des espèces non lucifuges et un phénomène de « puits écologique » (ASCEN).

Cependant, le fait de chasser autour de ces points lumineux peut exposer davantage les chauves-souris à leurs propres prédateurs en les rendant plus visibles mais aussi plus vulnérables car la lumière vive « brouillerait » leur sonar dont elles se servent habituellement pour les détecter (ASCEN).

L'éclairage de voirie à des niveaux d'éclairages importants (> 10 lux) peut être perçu comme une barrière supplémentaire immatérielle pour les chiroptères même pour les espèces les plus tolérantes à la lumière comme *Pipistrellus pipistrellus* dans les zones urbanisées déjà fragmentées (Hale et al. 2014, 2015), qui doivent alors dévier de leur trajectoire dite suboptimale, en termes de qualité et de territoire de chasse par exemple. De manière générale, cela peut accroître leurs dépenses énergétiques qui peuvent ne pas être compensées par les bénéfices issus de la capture des proies. À terme, cette source de fragmentation supplémentaire causée par la lumière pourrait isoler les chiroptères de leur territoire de chasse (Stone et al., 2009). En 2012, Stone et al. mettent en avant le fait que les LEDs réduiraient l'activité des espèces de chauves-souris à vol lent (*Rhinolophus hipposideros* et *Myotis spp.*) sans impacter les espèces à vol rapide du moins dans les milieux favorables à leur cycle de vie. Le développement de ces technologies pourrait ainsi créer de nouvelles concurrences intra-spécifiques.

Lacoeuilhe et al. (2014) soulignent qu'au-delà des compétitions intra-spécifiques induites, la lumière artificielle réduit globalement l'activité des chauves-souris. La lumière blanche, provenant de lampes à vapeur de mercure de l'étude, semble être plus perturbatrice que la couleur orange de la lampe à sodium basse pression, mais cela n'est pas toujours le cas notamment pour *Eptesicus serotinus* qui apparaît être uniquement négativement influencée par la lampe à sodium basse pression.

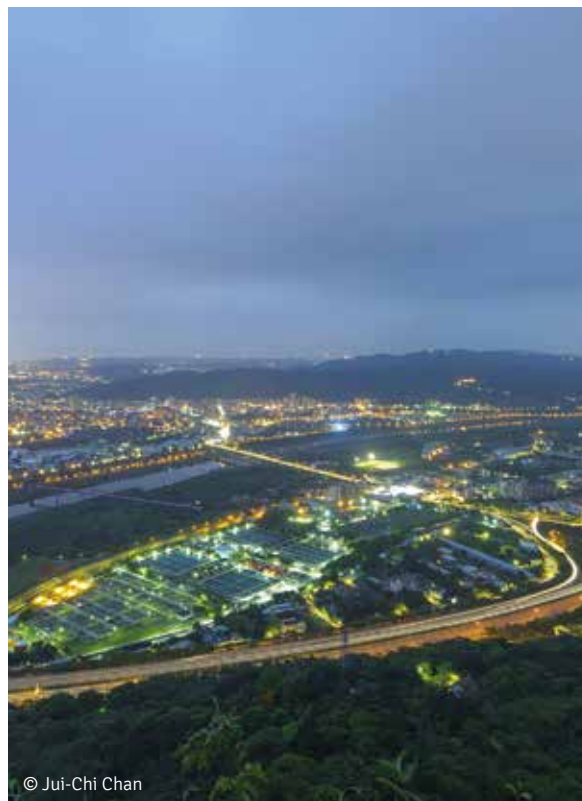
Récemment, une étude (Vernet, 2014) menée sur le territoire du PNR du Gâtinais français, avec le concours de l'ANPCEN, concluait que « l'extinction nocturne semble avoir un effet positif sur les espèces lucifuges comme les murins *Myotis spp.*, et un effet négatif sur les espèces attirées par les sources lumineuses comme les pipistrelles *Pipistrellus spp.* et les sérotines *Eptesicus sp.* Cette mesure d'extinction semblerait toutefois positive à mettre en place pour favoriser les déplacements et l'activité de l'ensemble de ces espèces nocturnes dans le cadre d'une trame verte, bleue et noire efficace » (Vernet, 2014). L'extinction des lampadaires pendant une grande partie de la nuit permettrait, en effet, de réduire les compétitions inter-spécifiques.

D'autre part, l'éclairage pourrait aller jusqu'à détruire des colonies de reproduction. Les juvéniles sont beaucoup moins présents dans les bâtiments illuminés, et la longueur de leurs avant-bras et leur faible masse corporelle suggèrent que la période de parturition débute plus tardivement et/ou que le taux de croissance est inférieur dans ces bâtiments (Buldogh et al., 2007).

Bien que crépusculaires ou nocturnes, les chauves-souris possèderaient les prérequis pour la vision diurne : une vision dichromatique et une vision des UV (Müller et al., 2009). Il peut être ainsi conseillé d'éviter l'utilisation des lampes émettant dans les basses longueurs d'ondes, d'autant plus que celles-ci attireraient davantage les insectes et donc *in fine* les chiroptères.

Chez les autres mammifères, les effets de l'éclairage sont moins documentés. Comme chez les humains, les autres mammifères exposés à la présence additionnelle de lumière risquent de subir un dérèglement de leurs rythmes biologiques du fait de l'inhibition de la sécrétion de mélatonine, ce qui pourrait avoir des effets sur les cycles du pelage et la reproduction par exemple (Rust, 1965 et Rust et al., 1969 dans Beier, 2006, Le Tallec et al. 2015). De même que chez les autres groupes d'espèces, on peut observer une modification des comportements de chasse. La lumière accroît les capacités visuelles la nuit, mais expose les différentes espèces à leurs prédateurs (Beier, 2006). Par exemple, Falkenberg et Clarke (1998), montrent dans leur étude que les souris à pattes blanches ont tendance à utiliser les zones protégées de la lumière lorsque des Rats-kangourou d'Ord sont introduits dans la chambre d'expérimentation.

D'autre part, l'apparition brutale d'une lumière vive peut éblouir les individus exposés, les rendant incapables d'agir pendant plusieurs secondes et donc d'éviter par exemple les collisions avec les voitures.



© Jui-Chi Chan

En ce qui concerne la sensibilité au spectre lumineux. Les primates sont des espèces trichomates, c'est-à-dire que les cônes de leur rétine sont sensibles à trois types de couleurs différents : le rouge, le vert et le bleu.

La majorité des mammifères sont cependant dichromates. Bien qu'il soit difficile de dresser un portrait type, les cônes sensibles aux grandes longueurs d'ondes le sont généralement autour de 550-560 nm, alors que ceux sensibles aux courtes longueurs d'ondes le sont autour de 440-450 nm. C'est le cas par exemples chez les canidés. D'autres espèces, comme les souris possèdent cependant une sensibilité à des longueurs d'ondes plus courtes. Elles sont ainsi sensibles aux UV (Lazareva et al., 2012).

3.8 Synthèse MEB-ANPCEN des effets perturbateurs de l'éclairage sur la biodiversité

Les impacts de la pollution lumineuse sont pluriels. Même si l'on peut faire ressortir des différences au sein de chaque groupe d'espèces, quelques grandes perturbations sont communes. Chez les vertébrés, la contamination lumineuse des phases d'obscurité naturelle peut désynchroniser les rythmes biologiques. La résultante peut être la perturbation de divers comportements comme les migrations, la reproduction ou encore la chasse.

D'une manière générale, les changements brutaux de luminosité peuvent éblouir ou aveugler les individus, avec pour conséquence l'augmentation du risque de collision et de leur vulnérabilité face à leurs prédateurs.

Ainsi, nombre d'espèces ont développé une phototaxie négative. Souvent, ce « rejet » de la lumière est lié à la difficulté de s'adapter rapidement aux changements d'intensité et/ou à un comportement de prudence vis-à-vis des prédateurs. La lumière peut constituer une opportunité pour ces derniers qui perçoivent ainsi mieux leurs proies. En conséquence, la pollution et les nuisances lumineuses peuvent désorganiser la chaîne trophique en créant de nouvelles compétitions intra et inter-espèces.

Cette phototaxie négative explique également le rôle fragmentant dont l'éclairage artificiel peut être à l'origine, au même titre que les infrastructures de transport ou l'artificialisation des sols, par exemple et l'utilité d'une trame nocturne, soit la prise en compte de la gestion de la lumière au sein des continuités écologiques.


La synthèse MEB-ANPCEN des études portant sur les impacts de l'éclairage artificiel sur la biodiversité permet de dresser la liste des longueurs d'ondes les plus défavorables pour chaque groupe d'espèces et/ou les spectres moins défavorables s'il est jugé nécessaire de mettre en place un éclairage (voir tableau ci-dessous).

Ces caractéristiques particulières propres à chaque espèce peuvent contribuer à orienter les choix et l'adaptation territoriale, en matière d'éclairage. L'enjeu est ainsi de trouver des solutions capables de diminuer l'impact de l'éclairage extérieur sur la biodiversité en maintenant les activités anthropiques nécessaires.

Tableau 5 : Bandes spectrales « à éviter » par groupes d'espèces (Tableau réalisé grâce aux informations issues de la synthèse bibliographique MEB-ANPCEN)

	UV	Violet	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge	IR
Longueurs d'ondes (nm)	<400	400 - 420	420 - 500	500 - 575	575 - 585	585 - 605	605 - 700	>700
Poissons d'eau douce	x	x	x	x	x	x	x	
Poissons marins	x	x	x	x				
Crustacés (zooplancton)	x	x*	x*					
Amphibiens et reptiles	x	x	x	< à 500 et > à 550	x	x	x	x
Oiseaux	x	x	x	x		x	x	x
Mammifères (hors chiroptères)	x	x	x	x			x	
Chiroptères	x	x	x	x				
Insectes	x	x	x	x				

x* : Probable mais non identifié dans la littérature scientifique

A photograph of a field of tall grasses at night. The grasses are illuminated from below, creating a strong glow and highlighting their textures. The background is dark, with many small, bright, out-of-focus light spots that resemble fireflies or distant lights. A semi-transparent blue rectangular box is centered in the middle of the image, containing white text.

Des préconisations
MEB-ANPCEN
pour un éclairage
extérieur moins
perturbant pour la
biodiversité

4 Des préconisations MEB-ANPCEN pour un éclairage extérieur moins perturbant pour la biodiversité

Les études techniques conduites par les fabricants ou installateurs, n'ont pas encore jusque-là intégré à leur conception les enjeux de la biodiversité dans ceux de l'environnement et n'ont donc pas permis de dresser les profils spécifiques d'éclairages moins perturbateurs. Pour ne plus impacter le fonctionnement des écosystèmes, il faudrait réduire considérablement la quantité de lumière artificielle nocturne ou tout simplement ne plus éclairer pendant la nuit. Cette préconisation reste la solution la plus pertinente à mettre en place dans les zones où la lumière est inutile en dehors des heures d'activités humaines identifiées.

Cependant, afin de concilier les besoins en éclairage utiles aux activités humaines avec les enjeux écologiques, il est nécessaire de pouvoir rechercher des solutions qui intègrent au mieux l'ensemble des contraintes.

Il est ainsi possible de faire ressortir de premières préconisations qui permettraient de réduire l'impact d'éclairages sur la biodiversité.

4.1 Les recommandations générales MEB-ANPCEN

Les préconisations utiles permettent de réduire la pollution et les nuisances lumineuses. Elles permettraient en plus d'effectuer des économies d'énergie. En d'autres termes, il s'agit de mettre en place des mesures de bon sens, permettant de conjuguer la réponse à deux objectifs environnementaux.

4.1.1 Usages, quantité de lumière et localisation

La première mesure consiste à faire preuve de sobriété énergétique et de sobriété lumineuse. La sobriété énergétique « consiste à interroger nos besoins puis agir à travers les comportements individuels et l'organisation collective sur nos différents usages de l'énergie, pour privilégier les plus utiles, restreindre les plus extravagants et supprimer les plus nuisibles » (Association négaWatt, 2011). Elle se différencie de l'efficacité énergétique qui « se définit comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu » (CESE, 2013). Ainsi, une efficacité énergétique accrue se traduit généralement par autant, voire plus, de lumière émise car les diminutions

de consommation d'énergie peuvent parfois conduire à éclairer davantage. La sobriété énergétique, qui passe par une rationalisation de notre usage des sources de consommation d'énergie, doit permettre d'atteindre la sobriété lumineuse (i.e. une moindre émission de lumière, et ce, quelle que soit la source d'énergie, électrique ou renouvelable) lorsque l'on aborde la question de l'éclairage.

L'atteinte de cet objectif passe par l'application des mesures que l'on pourrait qualifier de « bon sens ». **MEB et ANPCEN recommandent donc fortement de poser d'abord de nouveaux questionnements dans toute démarche d'éclairage, avant la mise en place d'installations lumineuses ou d'équipements.** Cette approche est la seule capable de déboucher sur des réponses nouvelles intégrant des enjeux pluriels.

Ces réponses peuvent conduire à une réduction de la durée d'éclairage, voire à une suppression des points lumineux facultatifs et les éclairages d'ambiance non indispensables aux activités humaines : éclairages placés à proximité des cours d'eau (berges et ponts) ou encore aux mises en lumière sous les arches des ponts, ou toute autre plage lumineuse venant interférer avec les zones d'activités, nidifications et de déplacements d'espèces sensibles.

Cette solution nécessite des observations et mesures de suivi, car, comme le soulignent Gaston et al. (2013), les pics de demande en éclairage coïncident avec le pic d'activité de nombreux animaux nocturnes et crépusculaires. Les enjeux de biodiversité sont différents d'une commune à une autre et évoluent selon les saisons, aussi des études et des mesures de suivi au niveau local, sont recommandées, pour adapter plus finement les éclairages aux besoins du vivant.

Le suivi in situ conduit donc à trouver le meilleur compromis afin de concilier les activités humaines avec les enjeux de non-perturbation du fonctionnement des écosystèmes.

Dans les zones où l'activité humaine reste forte, et dans les espaces à forts enjeux de biodiversité, on peut imaginer installer des luminaires proposant alternativement ou successivement des sources de large spectre en première partie de la nuit et ensuite des sources de bande spectrale réduite et adaptée à la présence dominante des espèces sur le site. Une bonne connaissance des horaires de fréquentation par les humains et des usages permettra d'affiner les solutions d'éclairage proposées. Cette solution est cependant difficilement généralisable en raison des surcoûts engendrés et doit être donc être choisie si le besoin d'un bon rendu de couleur est identifié comme nécessaire et à condition que les espèces présentes ne soient actives qu'au cœur de la nuit.

4.1.2 L'orientation du flux lumineux

Il est primordial de diminuer les déperditions lumineuses latérales en orientant de la manière la plus efficace possible les lampes afin que seul l'espace nécessitant d'être éclairé le soit. Par exemple, sur les ponts ou sur les berges, éviter d'éclairer directement ou indirectement l'eau (reflets du flux lumineux destiné à mettre en valeur l'architecture d'un pont par exemple) et concentrer les faisceaux sur la voirie. L'eau des rivières, cours d'eau, lacs ou du littoral n'est pas un simple support physique inerte pour les jeux de lumière, mais un milieu naturel avec des écosystèmes spécifiques. Leur bon état de fonctionnement entraîne la qualité de vie, de reproduction et d'adaptation de la flore et de nombre d'espèces, dont dépendent de manière liée, nombre des aspects de la vie humaine.

En pratique, **on peut utiliser des coupes-flux de couleur noire** à rajouter au niveau de chaque point d'éclairage afin d'atténuer toute lumière envoyée en dehors de la surface utile qui peut participer également à l'éblouissement ou l'attraction directe d'espèces.

Il est également indispensable d'éviter les déperditions lumineuses en direction du ciel afin de moins impacter les oiseaux et les chiroptères. Cette disposition permet également de réduire les halos lumineux et donc la pollution lumineuse. Dans ce cadre, **le luminaire doit être choisi avec un ULOR de 0 % en position d'installation. Le luminaire retenu doit être équipé d'une vasque plane et être incliné à 0° par rapport à l'horizontale.**

Pour l'éclairage dit fonctionnel (par différence avec l'éclairage dit d'ambiance), **il convient d'utiliser des luminaires « full cut-off »** (lampes encastrées avec un verre plat et installées orientées strictement à l'horizontale). **Pour l'éclairage d'ambiance, il faudrait utiliser des lampes entièrement bafflées.** (ANPCEN « Recommandations pour un éclairage assurant, sécurité, confort visuel, économies et protection de l'environnement »)

Figure 13 : Exemple de luminaire «full cut-off» (ANPCEN)



Par ailleurs, il faut prêter attention aux sols clairs qui permettent d'optimiser la luminance de la surface éclairée, d'améliorer la perception nocturne de l'espace et de réduire de manière significative la consommation énergétique d'une installation d'éclairage public. En effet, **l'installation de sols clairs peut être contradictoire avec la volonté de diminuer la pollution lumineuse** issue de la réflexion de la lumière sur le sol, de fait non orientée

ou multidirigée. Il faut donc clairement différencier les types de sols et d'aménagements réalisés au cœur d'une zone naturelle photosensible de ceux mis en œuvre en milieu urbain dense et prévoir au moins un éclairage plus faible d'une surface claire, permettant d'avoir la même luminance que dans le cas d'un revêtement de sol standard plus foncé. D'autre part, une surface obscure à éclairer avec le même niveau d'éclairage nécessitera des sources avec une puissance lumineuse beaucoup plus puissantes et donc plus impactantes pour la biodiversité si la lumière n'est pas dirigée exclusivement sur la surface à éclairer.

4.1.3 L'espacement entre luminaires

Il est utile d'optimiser l'espace inter-luminaire afin de réduire les flux lumineux et les consommations d'énergie inutiles.

La hauteur et l'espacement des luminaires doivent être étudiés selon l'impact sur la biodiversité du flux lumineux (éblouissement ou attraction suivant les intensités lumineuses émises, contribution au halo) et selon le confort visuel des utilisateurs. Les franges et lisières de zones naturelles sensibles, peu habitées verront privilégier les éclairages les moins impactants⁽²⁷⁾.

4.1.4 Optimiser le temps d'éclairage avec les technologies disponibles

Après une réflexion préalable sur les usages, les durées d'éclairage et les points lumineux réellement utiles, **il est conseillé d'installer des horloges astronomiques** permettant d'optimiser les heures d'éclairage et d'extinction en fonction des heures réelles de coucher et de lever du soleil tout au long de l'année. Ces horloges peuvent également être programmées en fonction de l'effectivité des activités humaines et donc pour des extinctions en cœur de nuit par exemple.

Il est également possible d'utiliser des variateurs d'intensité afin de diminuer l'intensité lumineuse pendant les heures les moins fréquentées par la population. De telles mesures permettraient de réduire les nuisances lumineuses dans le temps d'usage. Il faut cependant veiller à ce que le recours à ce type de matériel ne soit pas la conséquence d'un projet d'éclairage surdimensionné par rapport aux besoins en fonctionnement de base avant variation.

Il ne peut être recommandé en revanche d'avoir recours à un éclairage à la demande, à travers l'installation de détecteurs ou de systèmes d'activation à distance (à l'aide par exemple des téléphones portables), dans des zones à forte fréquentation humaine et où l'on recense des espèces nocturnes. En effet, comme évoqué précédemment, le changement brutal d'intensité d'éclairage peut

⁽²⁷⁾ Par exemple hauteur de feu entre 6 et 8 mètres avec un espacement correspondant supérieur à 6 fois la hauteur.

aveugler ou éblouir les différentes espèces. Ces effets, s'ils sont répétés, peuvent engendrer des perturbations comportementales chez les espèces exposées.

4.1.5 Puissances installées par armoire et par luminaire

Les lampes évoluent techniquement et possèdent des rendements lumineux de plus en plus performants. Aussi, il est capital, pour diminuer la quantité de lumière émise, de diminuer :

- la puissance électrique souscrite souvent très supérieure aux besoins réels ;
- la puissance lumineuse installée⁽²⁸⁾ de chacune des lampes.

Il est ainsi important de ne pas convertir le gain en efficacité énergétique issue d'une rénovation pour éclairer davantage.

La meilleure performance des luminaires et une meilleure orientation des flux lumineux peuvent permettre très facilement au minimum de diviser par deux la puissance totale électrique installée et de 30 % la puissance lumineuse totale installée pour un nombre de luminaires constant.

4.2 Lampes et distributions spectrales

La synthèse des études portant sur les impacts de l'éclairage artificiel sur la biodiversité permet de dresser la liste des longueurs d'ondes les plus défavorables au cycle de vie de chaque groupe d'espèces. Cette synthèse a permis d'identifier les lampes dont les émissions spectrales peuvent être jugées comme « moins néfastes » pour chaque groupe d'espèces. Une liste de lampes aux impacts néfastes « modérés » a également été établie. Cette dernière a pour objectif de fournir une palette de choix plus large pour les décideurs dans la situation où l'usage des lampes dites les « moins néfastes » ne peuvent correspondre avec les besoins d'un éclairage fonctionnel. Par exemple, les LEDs de couleur davantage utilisées comme sources d'éclairage d'ambiance, paysager et architectural, ne pourront être installées pour éclairer des routes.

Important : *Bien que les bandes spectrales des lampes présentées ci-dessous soient mentionnées comme étant moins néfastes que les autres lampes, cela ne veut pas dire qu'elles n'ont pas d'impacts sur le vivant. Toutes les lampes, conçues pour les êtres humains, sont potentiellement perturbatrices. La meilleure solution reste de réduire la quantité globale de lumière émise et la durée d'éclairage ou de ne pas éclairer. Néanmoins, l'éclairage artificiel est parfois nécessaire aux activités de la société. Cette partie a ainsi pour but d'apporter des éléments d'orientation pour une prise de décision plus adéquate.*

⁽²⁸⁾ Calculs effectués par l'ANPCEN.

Tableau 6 : Lampes pouvant être recommandées lorsque la présence d'un éclairage artificiel demeure nécessaire											
Longueurs d'ondes (nm)	UV							IR	Lampes les « moins néfastes »	Lampes néfastes mais aux impacts plus « modérés »	
	<400	400 - 420	420 - 500	500 - 575	575 - 585	585 - 605	605 - 700				>700
Poissons d'eau douce	x	x	x	x	x	x	x	x	- Sodium Basse Pression - LEDs Ambrées à spectre étroit	- Sodium Haute Pression	
Poissons marins	x	x	x	x					- Sodium Basse Pression - Sodium Haute Pression	- Fluo compacte (Blanc le plus chaud < 2700°K)	
Crustacés (zooplancton)	x	x*	x*						- LEDs Ambrées à spectre étroit - LEDs Rouges	- Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)	
Amphibiens et reptiles	x	x	x	< à 500 et > à 550	x	x	x	x		- Sodium Basse Pression	
Oiseaux	x	x	x	x		x	x	x	- Sodium Basse Pression - LEDs Ambrées à spectre étroit	- Sodium Haute Pression - Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)	
Mammifères (hors chiroptères)	x	x	x	x				x	- Sodium Basse Pression - LEDs Ambrées à spectre étroit	- Sodium Haute Pression - Fluo compacte (Blanc le plus chaud < 2700°K) - Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)	
Chiroptères	x	x	x	x					- Sodium Basse Pression - Sodium Haute Pression	- Fluo compacte (Blanc le plus chaud < 2700°K)	
Insectes	x	x	x	x					- LEDs Ambrées à spectre étroit - LEDs Rouges	- Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)	

x* : Probable mais non identifié dans la littérature scientifique

Quelles sont les lampes à privilégier lorsque la présence d'un éclairage artificiel demeure nécessaire ?

Des recherches scientifiques complémentaires sont nécessaires afin de déterminer précisément l'impact des différentes longueurs d'ondes sur les différentes espèces. Néanmoins, il peut être avancé que les lampes à sodium basse pression (SBP) voire les LEDs ambrées à spectre étroit sont moins perturbatrices pour la biodiversité. Les différentes espèces sont moins sensibles au spectre extrêmement étroit de leur lumière. Dans une moindre mesure et dans le cadre des activités nécessaires à la société, il serait davantage recommandé d'avoir recours à des lampes à sodium haute pression (SHP), voire pour des cas particuliers aux lampes fluo compactes et fluorescentes dont l'IRC est plus élevé. Il faut cependant faire attention au profil spectral des différents modèles en privilégiant dans la plupart des situations, des modèles avec une température de couleur chaude (< 2700°K) correspondant à une émission dans les basses longueurs d'ondes (violet, bleu et vert) la plus faible possible.

Quelles sont les lampes dont l'utilisation est à éviter ?

D'une manière générale, **les lampes aux iodures métalliques dont le spectre d'émission est large ne sont pas recommandées. Il en est de même pour les LEDs blanches.** Ces dernières émettent dans toutes les longueurs d'ondes de 400 à 700 nm avec un pic d'émission dans le bleu. Le

déploiement large de cette technologie n'est pas sans poser questions, tant pour les humains que la biodiversité. Un rapport de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), datant de 2010, fait ressortir les risques sanitaires potentiels liés au développement de cette technologie pour différentes personnes : risques photochimiques de la lumière bleue, éblouissement, perturbation des risques circadiens, risques potentiels liés aux effets stroboscopiques (cf. encadré sur l'Avis de l'ANSES). Cette étude portant sur les risques des LEDs blanches sur la santé humaine apporte des informations qui doivent également alerter sur les impacts de cette technologie relativement récente et en évolution constante, sur les différentes espèces fauniques (traitées spécifiquement dans notre étude) et floristiques.

En effet, comme on a pu le voir précédemment, les seuils de perception visuelle sont bien moindres chez les espèces nocturnes et chez un certain nombre d'espèces diurnes. Ainsi, une lumière dont la luminance est très forte (ce qui est le cas des LEDs, cf. encadré sur l'avis de l'ANSES) aura des effets d'autant plus importants sur les espèces. Une grande majorité a d'ailleurs une très forte sensibilité aux basses longueurs d'ondes. De ce fait, les sources d'éclairage équipées de LEDs blanches sont potentiellement plus perturbatrices et impactantes sur le reste du monde du vivant.

Une mise à jour de l'avis de l'ANSES a été programmée en 2015 et figure dans le nouveau plan national santé-environnement (PNSE3). Il portera sur les impacts sanitaires et environnementaux des LEDs.



© Skyversuschoy

Éléments contenus dans l'avis de l'ANSES – Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (2010) :

Le fait que ces LEDs émettent avec un pic dans les basses longueurs d'ondes pourrait potentiellement avoir plusieurs effets perturbateurs. L'avis pointe deux risques particulièrement préoccupants :

► **les effets photochimiques de la lumière bleue :** Ce « risque résulte généralement d'expositions peu intenses répétées sur de longues durées. (...) La lumière bleue est ainsi reconnue pour ses effets néfastes et dangereux sur la rétine, résultant d'un stress oxydatif cellulaire. Les effets de la lumière bleue sur la dégénérescence liée à l'âge (DMLA) sont fortement soupçonnés. »

Selon la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique certaines LED sont classées en risque 2 (risque modéré) sur un maximum de 3 (risque élevé), alors que toute les autres sources d'éclairage disponibles pour le grand public sont classées en risque 0 (exempt de risque) ou 1 (risque nul). Le rapport précise : « La norme n'étant pas adaptée aux systèmes à LED, ces travaux ne permettent pas d'évaluer rigoureusement les risques photobiologiques liés aux LED, mais simplement traditionnels. »

► **l'éblouissement :** « En éclairage d'intérieur, il est admis qu'une luminance supérieure à 10 000 cd / m² est visuellement gênante quelle que soit la position du luminaire dans le champ visuel. En raison notamment du caractère ponctuel de leur surface d'émission, les LED peuvent présenter des luminances 1 000

fois plus élevées. Le niveau de rayonnement direct de ce type de source peut ainsi largement dépasser le niveau d'inconfort visuel, bien plus qu'avec les éclairages dits « classiques » (halogènes, lampes basses consommation). »

D'autres risques sont également mentionnés :

► **la perturbation des risques circadiens :** « L'horloge biologique et la contraction pupillaire sont régulées chez l'homme par des longueurs d'onde situées autour de 480 nm qui suppriment la production de mélatonine (hormone participant à la régulation de l'horloge biologique et donc du cycle circadien). Les LED présentent un spectre fondamentalement différent de celui de la lumière naturelle, avec une très faible proportion à 480 nm. Ceci pourrait exposer à un risque de dérèglement de l'horloge biologique et, par conséquent, des rythmes circadiens. Ces risques seraient accrus par des températures de couleur élevées (blanc froid et bleu), que l'on rencontre fréquemment dans les systèmes d'éclairage à LED. »

► **les risques liés au papillotement de la lumière émise par les LEDs :** « Les alimentations électriques des systèmes d'éclairage à LED peuvent, en fonction de leur architecture, fournir une puissance présentant des variations temporelles, ce qui se traduit par des fluctuations de l'intensité de la lumière produite, plus ou moins perceptibles par l'œil. Ces effets stroboscopiques, qui n'ont cependant jamais été étudiés en profondeur, peuvent avoir une incidence directe sur la santé (crises d'épilepsie pour les sujets à risques), les performances visuelles et la sécurité. »

4.3 Des pistes de réflexions visant à encourager la prise en compte intégrée des externalités de l'éclairage

Des évolutions institutionnelles en faveur d'une prise en compte plus intégrée des externalités de l'éclairage extérieur sont nécessaires pour la mise en œuvre effective des objectifs fixés par les lois Grenelles 1 et 2. **Avec des mesures particulièrement restrictives à prendre pour les espaces protégés et les continuités écologiques, c'est la façon de penser l'éclairage artificiel extérieur qui doit être redéfinie, bien au-delà des seules performances photométriques ou d'efficacité énergétique, et ce, sur l'ensemble du territoire. Cette prise de conscience est nécessaire à la préservation du rythme jour-nuit régulateur, garant du bon fonctionnement des organismes et des écosystèmes.** Quelques pistes sont évoquées ici, l'ANPCEN en développant de complémentaires.

4.3.1 Sortir d'une approche centrée sur la seule efficacité énergétique

Nous l'avons vu, les enjeux qui entourent l'éclairage extérieur dépassent les seuls enjeux énergétiques. Sans en diminuer leur portée, il apparaît indispensable d'intégrer une démarche plus globale dans les réflexions d'aménagement, dans les orientations fixées par l'Etat, et dans la politique de Responsabilité sociale des grands groupes de fabricants et d'installateurs ou les relais.

Les seules démarches d'efficacité énergétique ne garantissent pas de progrès, ni en matière de sobriété énergétique, ni en matière de sobriété lumineuse.

Pour ce faire, il est nécessaire d'intégrer une dimension environnementale dans les textes de lois, réglementations et dispositifs relatifs à l'énergie. Il faudrait désormais « déssectorialiser » les deux approches. Les aides et subventions accordées pour la rénovation de l'éclairage extérieur des communes devraient ainsi être modulées au-delà des seuls objectifs d'efficacité énergétique et de renouvellement des installations.

Le changement dans l'approche aujourd'hui très orientée « économie d'énergie » doit être initié et accompagné par une communication de la part des ministères concernés auprès des différentes parties prenantes (entreprises, élus et citoyens) afin que chacun puisse prendre conscience des enjeux sanitaires et écologiques de la croissance de la quantité de lumière émise la nuit et de la spécificité des impacts de certains équipements.

4.3.2 Préserver l'obscurité naturelle des espaces protégés

La France compte de multiples espaces naturels protégés. Les installations lumineuses des espaces protégés mentionnés dans le décret n° 2011-831 du 12 juillet 2011 relatif à la prévention et à la limitation des nuisances lumineuses doivent faire l'objet « de mesures plus restrictives que celles appliquées aux dispositifs implantés en agglomération et en dehors des agglomérations. » **Ainsi, un réel travail doit être mené sur ces zones afin que ce décret soit mis en application à la hauteur des ambitions formulées.**

Au-delà des espaces protégés spécifiés dans le décret, l'ensemble des espaces protégés français (cf. partie 1.1.2) devraient faire l'objet de la mise en place de schémas d'aménagement lumière ambieux et restrictifs.

Des mesures plus restrictives au sein des espaces protégés. Une trame nocturne au sein des continuités écologiques, pour limiter une fragmentation supplémentaire des milieux par la lumière artificielle.

4.3.3 Intégrer des Trames Nocturnes à l'intérieur des Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE) et trames vertes et bleues (TVB)

Le travail de synthèse effectué (cf. partie 3) fait ressortir de multiples effets perturbateurs dont peut être à l'origine l'éclairage artificiel. Les infrastructures terrestres et aquatiques éclairées peuvent ainsi représenter de véritables barrières pour la circulation des espèces et ainsi fragmenter les habitats.

Si les orientations générales données aux SRCE mentionnent la pollution lumineuse, les premiers SRCE adoptés⁽²⁹⁾ n'intègrent que peu ou pas du tout la question des nuisances lumineuses. L'obscurité doit être privilégiée et préservée dans les espaces naturels. Dans les espaces urbains habités attenants, il est aujourd'hui souhaitable d'étudier et de mettre en place systématiquement une

trame nocturne, soit une prise en compte de la gestion de la lumière nocturne dans les continuités écologiques. Ces mesures devront permettre le maintien de la perméabilité des trames verte et bleue la nuit pour le déplacement des espèces, pour leur cycle de vie (alimentation, reproduction, migration). Pour limiter une fragmentation supplémentaire des milieux et des trames vertes et bleues locales par la lumière artificielle nocturne, en fonction des spécificités écologiques, et d'usages des espaces concernés, des variations et des évolutions des niveaux lumineux, il peut être proposé des extinctions partielles ou temporaires, en fonction de la présence des usagers, des périodes de la nuit et de l'année comme des périodes de photosensibilité maximale des espèces présentes.

Pour ce faire, il est dès aujourd'hui nécessaire de mener un travail qui permettra d'inscrire la question de l'éclairage nocturne au cœur de la gestion des trames vertes et bleues, par une trame nocturne.

Il sera ainsi intéressant de pouvoir d'une part matérialiser dans les cartographies et les atlas de biodiversité communaux les points de vigilance sur lesquels faire un suivi et faire ressortir les barrières lumineuses avérées. D'autre part, il sera utile de prendre en compte, à plus large échelle, les effets cumulatifs à distance des différents halos produits par les points lumineux sur les différents milieux, **en croisant une cartographie de la pollution lumineuse depuis le sol et non depuis un point de vue aérien afin de la rapprocher au plus des effets terrestres perçus, avec les différentes sous-trames définies dans les SRCE.**

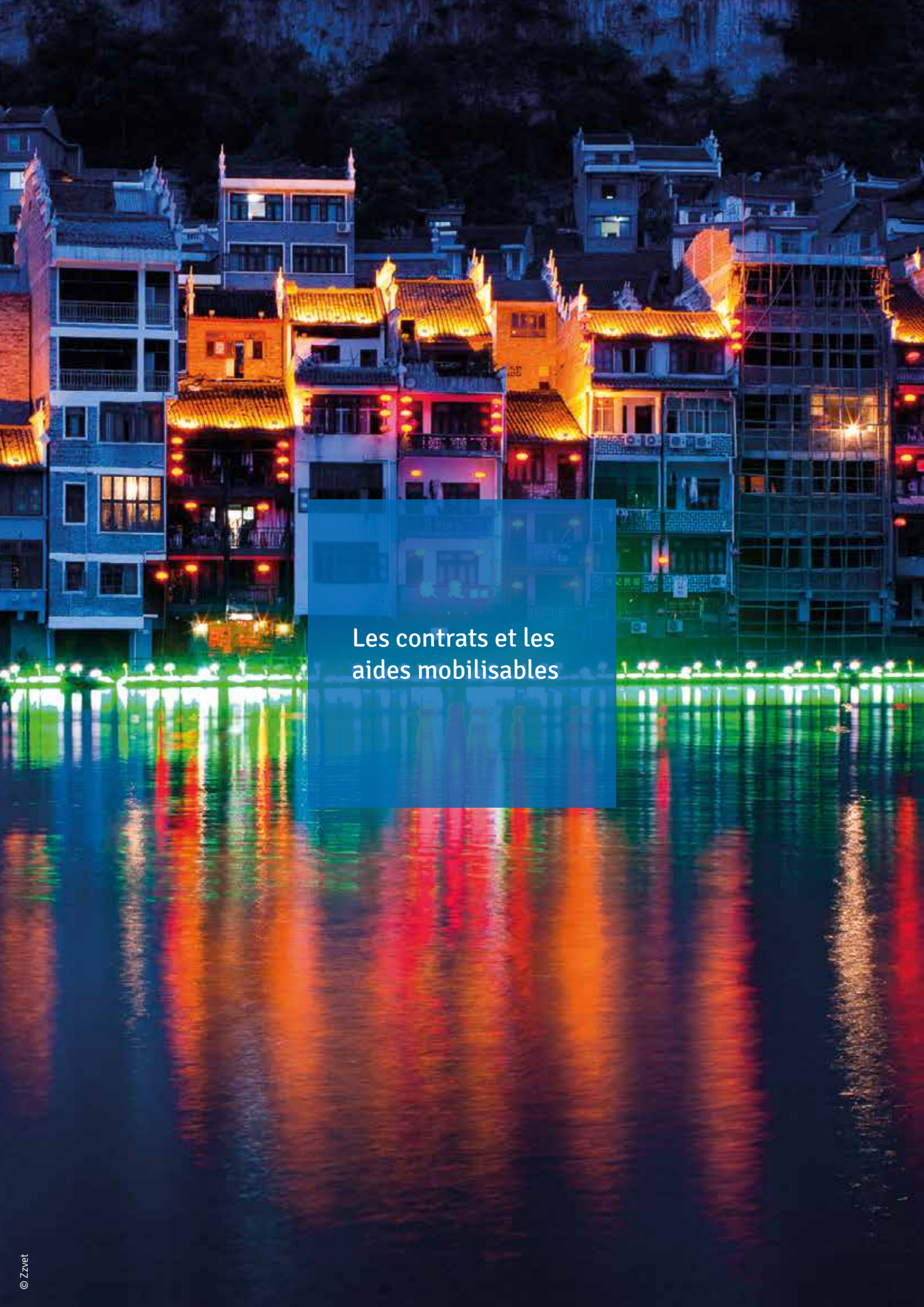
4.3.4 Encourager la recherche

Il est nécessaire d'encourager les programmes de recherche concernant l'impact de l'éclairage sur la biodiversité et la santé. Il persiste aujourd'hui des questions qui méritent d'être documentées : les effets des différentes longueurs d'ondes sur la santé, la tolérance des différentes espèces (de la faune et de la flore) aux différents spectres et niveaux d'éclairement et les conséquences potentielles des perturbations sur le fonctionnement des différents écosystèmes.

Les risques déjà identifiés concernant les effets des LEDs sur la santé ainsi que le manque de connaissances précises concernant l'impact des différents types de lampes sur les différentes espèces doivent alerter sur la nécessité de développer des programmes de recherche portant sur les externalités de l'éclairage pour tout être vivant.

⁽²⁹⁾ SRCE adoptés en mai 2015 : Alsace, Basse Normandie, Ile-de-France, Nord-Pas-de-Calais, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes, Centre, Midi-Pyrénées, Bourgogne.





Les contrats et les aides mobilisables

5

Les contrats et les aides mobilisables

En France, on compte près de 11 millions de points lumineux en 2015 d'après les derniers chiffres de l'ADEME⁽⁵⁰⁾, qui fonctionneraient 3300 heures en moyenne en 2012, d'une puissance de 160 W en moyenne par point lumineux, en baisse de 10 W seulement depuis 2005, pour une consommation annuelle de 5.6 TWh, équivalente à celle de 2005. L'éclairage public constitue ainsi le deuxième grand poste du bilan énergétique des collectivités en métropole, et le premier en Outre-Mer. Il représente 42 % des consommations d'électricité des communes métropolitaines pour 37 % de leur facture d'électricité, et 58 % de celles des départements d'Outre-Mer pour 60 % de leur facture. On peut noter que le prix de l'électricité dédié à l'éclairage public a en moyenne augmenté de 40 %. Si l'on ajoute à cela les coûts des nouveaux investissements et les coûts d'entretiens des installations, l'éclairage public représente une source de dépense non négligeable pour les communes et donc pour les citoyens.

Selon l'ADEME, en France plus de la moitié du parc est aujourd'hui vétuste. Il se renouvelle au taux moyen de 3 % par an. Près de 40 % des luminaires en service ont plus de 20 ans. En 2012, 66 % du parc était composé de lampes au sodium, 22 à 25 % de lampes à vapeur de mercure, les 9 à 12 % restant étant occupé par les lampes mixtes, les lampes fluorescentes, lampes aux iodures métalliques ou encore les LEDs.

Lorsqu'une rénovation de l'éclairage extérieur est nécessaire, elle doit s'inscrire dans une approche cohérente d'ensemble et responsable, à même de prendre en considération des besoins d'activités et de déplacements, comme les économies d'énergie, les impacts sur la biodiversité, la santé et la capacité d'observation du paysage nocturne que constitue depuis toujours le ciel étoilé.

Il ne faut pas sous-estimer les coûts d'investissement initiaux des projets, souvent effectués pour plusieurs décennies. Bien souvent, les collectivités ne disposent d'ailleurs pas de toutes les compétences humaines et techniques leur permettant d'envisager de s'engager seules dans la conception et les travaux de rénovations de leur parc d'éclairage. Elles doivent ainsi s'attacher les services de syndicats d'énergie ou d'électrification, d'entreprises prestataires et d'associations expertes.

Le choix s'effectue le plus souvent en fonction des montants d'investissement et des contraintes budgétaires. Des supports juridiques offrent aux décideurs des possibilités plus ou moins intégratrices permettant d'inclure et d'imposer des objectifs à atteindre conjointement en matière de sobriété énergétique et de réduction des nuisances lumineuses dans les projets.

⁽⁵⁰⁾ B. Lafitte, 2014

5.1 Les contrats mobilisables pour la rénovation des réseaux d'éclairage public

Les directives européennes « marchés publics⁽⁵¹⁾ » et « concessions⁽⁵²⁾ » sont entrées en vigueur le 17 avril 2014. Les Etats membres ont jusqu'au 18 avril 2016 pour les transposer. Dans ce cadre, les nouveaux textes qui seront adoptés auront pour objectif de rationaliser le droit de la commande publique en rassemblant notamment dans un seul texte les règles relatives aux marchés publics et aux partenariats public-privé. Le développement qui suit s'appuie sur les textes existants lors de la réalisation de l'étude et donc avant l'adoption des nouvelles mesures. Néanmoins, les grandes orientations présentées ci-dessous visant, entre autres, à encourager le recours aux contrats globaux, resteront d'actualité.

5.1.1 Le cadre général : les contrats mobilisables

Si la collectivité souhaite passer par le biais d'une entreprise publique ou privée, elle peut recourir aux :

- marchés publics (travaux, fournitures, services et marchés globaux de performance) ;
- partenariats publics privés (contrats de partenariat, délégations de service public, baux emphytéotiques administratifs, autorisations d'occupation temporaire) ;

Les délégations de service public et les contrats de partenariat sont en règle générale conclus sur plusieurs dizaines d'années. Ce n'est pas le cas des marchés publics qui sont en pratique souvent de plus courte durée.

Par ailleurs, notons que les contrats de performance énergétique (CPE) développés ici à la suite de l'analyse effectuée sur les marchés publics et les partenariats publics privés sont un objet contractuel, applicable aussi bien aux marchés publics qu'aux contrats de partenariat.

⁽⁵¹⁾ La directive 2014/24/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 sur la passation des marchés publics et abrogeant la directive 2004/18/CE ; - La directive 2014/25/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à la passation de marchés par des entités opérant dans les secteurs de l'eau, de l'énergie, des transports et des services postaux et abrogeant la directive 2004/17/CE ;

⁽⁵²⁾ La directive 2014/23/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 sur l'attribution de contrats de concession.

5.1.1.1. LES MARCHÉS PUBLICS

L'article 1 du code des Marchés Publics définit les marchés publics comme « des contrats conclus à titre onéreux entre les pouvoirs adjudicateurs⁽⁵³⁾ (...) et des opérateurs publics ou privés, pour répondre à leurs besoins en matière de travaux, de fournitures ou de services. »

► Les marchés publics de travaux :

Les marchés publics de travaux sont les marchés conclus avec des entrepreneurs, qui ont pour objet soit l'exécution, soit conjointement la conception et l'exécution d'un ouvrage ou de travaux de bâtiment ou de génie civil **répondant à des besoins précisés par le pouvoir adjudicateur qui en exerce la maîtrise d'ouvrage**. Un ouvrage est le résultat d'un ensemble de travaux de bâtiment ou de génie civil destiné à remplir par lui-même une fonction économique ou technique.

► Les marchés publics de fournitures :

Les marchés publics de fournitures sont les marchés conclus avec des fournisseurs qui ont pour objet l'achat, la prise en crédit-bail, la location ou la location-vente de produits ou matériels.

► Les marchés publics de services :

Les marchés publics de services sont les marchés conclus avec des prestataires de services qui ont pour objet la réalisation de prestations de services. Les prestations de services sont celles des activités du fournisseur qui sont nécessaires à la fourniture du service. A ceux-ci s'ajoutent les marchés globaux de performance :

Ces marchés publics permettent **d'associer les missions de conception, de réalisation et d'exploitation ou de maintenance** « afin de **remplir des objectifs chiffrés de performance** définis notamment en termes de niveau d'activité, de qualité de service, **d'efficacité énergétique ou d'incidence écologique** » (Article 73 du code des marchés publics).

En ce sens ces marchés peuvent être utilisés pour réaliser tout projet dans lequel il existe un objectif de performance mesurable. On peut donc imaginer que dans le cadre d'une rénovation d'un parc d'éclairage public, ces contrats puissent être mobilisés afin de réaliser conjointement des économies d'énergie et de réduire l'incidence écologique.

Au sein des marchés globaux, on peut distinguer : les marchés de réalisation et d'exploitation ou de maintenance (REM) ; et les marchés de conception, de réalisation et d'exploitation ou de maintenance (CREM).

A la différence des contrats de partenariat, les marchés publics globaux permettent de déroger aux principes d'allotissement⁽⁵⁴⁾ mais ne prévoient pas de clause de paiement différé. En conséquence, dans le cadre de ce

type de marchés publics « les opérations de construction doivent être réglées par la personne publique sous forme d'avance, d'acompte puis de solde au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Les opérations de maintenance sont réglées au fur et à mesure de leur exécution, ce qui ne constitue pas un paiement différé, mais l'exécution d'un contrat à exécution successive » (Chong et al., 2012).

Les contrats de performance énergétique (CPE), évoqués plus loin, peuvent se présenter sous la forme d'un marché global de performance ou d'un contrat de partenariat.

Lorsque le marché passé par le pouvoir adjudicateur comporte des prestations de conception et de travaux sous maîtrise d'ouvrage publique (loi MOP⁽⁵⁵⁾), l'article 73 II du Code des Marchés Publics (CMP) spécifie que « si un tel marché comprend la réalisation de travaux qui relèvent de la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 [loi MOP], l'entrepreneur ne peut être associé à la conception que pour la réalisation d'engagements de performance énergétique **dans un ou des bâtiments existants**, ou pour des motifs d'ordre technique tels que définis à l'article 37. » Dès lors, on aurait pu s'interroger sur la possibilité de pouvoir recourir à ces contrats dans des domaines autres que le bâtiment, comme l'éclairage public.

En réponse à une question de Mme Françoise Des-camps-Crosnier, députée des Yvelines, concernant le périmètre des marchés globaux de performance, le Ministère de l'Economie, du Redressement productif et du Numérique précise le 12 août 2014 que « les pouvoirs adjudicateurs peuvent recourir aux REM et aux CREM tant pour les projets portant sur des bâtiments que pour ceux portant sur des infrastructures telles que **l'éclairage public** ou la construction-réhabilitation et l'exploitation de canalisations et de réseaux publics si les conditions prévues à l'article 73 [du code des marchés publics] sont remplies » (Assemblée Nationale, août 2014).

5.1.1.2. LES CONTRATS DE PARTENARIAT, SEULS PPP POUVANT ÊTRE MOBILISÉS

Les partenariats publics privés (PPP) comprennent les contrats de partenariat, les délégations de service public (DSP), les Baux Emphytéotiques Administratifs (BEA) et l'Autorisation d'Occupation Temporaire [du domaine public] (AOT) (Mission d'appui aux partenariats publics privés-MAPPP, 2011). **Le terme partenariat public privé (PPP⁽⁵⁶⁾) est souvent utilisé de manière abusive pour désigner un contrat de partenariat.**

⁽⁵³⁾ La notion de pouvoir adjudicateur sert à désigner l'acheteur public en tant que personne morale

⁽⁵⁴⁾ L'allotissement est désormais érigé en principe pour susciter une réelle concurrence entre les entreprises, quelle que soit leur taille. Un lot est une unité autonome qui est attribuée séparément. L'allotissement est la décomposition d'un marché en plusieurs lots pour des raisons économiques, financières ou techniques. Les lots sont susceptibles de faire l'objet d'une attribution distincte. (Marché-public.fr)

⁽⁵⁵⁾ Loi MOP : loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 modifiée relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée. Dans cette loi, le maître d'œuvre est défini comme « la personne de droit privé ou le groupement de personnes de droit privé qui doit permettre d'apporter une réponse architecturale, technique et économique au programme mentionné à l'article 2 ». Ce dernier précise qu'il appartient au maître d'ouvrage, « après s'être assuré de la faisabilité et de l'opportunité de l'opération envisagée, d'en déterminer la localisation, **d'en définir le programme**, d'en arrêter l'enveloppe financière prévisionnelle, d'en assurer le financement, de choisir le processus selon lequel l'ouvrage sera réalisé et de conclure, avec les maîtres d'œuvre et entrepreneurs qu'il choisit, les contrats ayant pour objet les études et l'exécution des travaux ».

⁽⁵⁶⁾ Au vue de la multiplicité des outils juridiques qui entourent les PPP, en mars 2014, Pierre Moscovici a proposé d'unifier tous les types de PPP autour d'un seul et même contrat, le contrat de partenariat.

► Les AOT sont des autorisations d'occupation temporaire du domaine public. Une personne publique (dans notre cas la commune) autorise, contre le versement d'une redevance, son cocontractant à exploiter une parcelle du domaine public. Ces contrats s'apparentent à des baux et ne sont donc **pas applicables à l'éclairage public**.

► Les BEA permettent à une collectivité territoriale qui est propriétaire d'un bien immobilier de le louer à un tiers qui construira un ouvrage sur le domaine public pour ensuite le louer à la collectivité propriétaire du terrain. Cela va concerner la réalisation d'une opération d'intérêt général relevant de la compétence de la collectivité ou de l'accomplissement pour le compte de la collectivité d'une mission de service public. Là-encore, cela n'est **pas adapté à l'éclairage public**.

► Les DSP : recouvrent plusieurs mécanismes : la concession d'aménagement, l'affermage, la régie intéressée et la gérance⁽³⁷⁾. La délégation de service public est « un contrat par lequel une personne morale de droit public confie la gestion d'un service public dont elle a la responsabilité à un délégataire public ou privé, dont la rémunération est substantiellement liée au résultat de l'exploitation du service. Le délégataire peut être chargé de construire des ouvrages ou d'acquérir des biens nécessaires au service » (loi n° 2001-1168 du 11 décembre 2001, dite « loi Murcef »). Par conséquent, le mode de rémunération du délégataire **ne permet pas de pouvoir recourir à une DSP pour l'éclairage public** puisque le délégataire se rémunère sur l'exploitation du service en percevant des redevances prélevées sur les usagers. Or, en matière d'éclairage public, l'usager ne paie pas directement au délégataire une redevance pour être éclairé, il n'y a donc pas pour lui de recettes provenant des usagers.

► Les contrats de partenariats : L'article L. 14141 du code général des collectivités territoriales (modifiée par la loi n°2008-735 du 28 juillet 2008 relative aux contrats de partenariat et par l'art. 14 de la LAPCIPP⁽³⁸⁾) dispose que : « Le contrat de partenariat est un contrat administratif par lequel une collectivité territoriale ou un établissement public local confie à un tiers, pour une période déterminée en fonction de la durée d'amortissement des investissements ou des modalités de financement retenues, une mission globale ayant pour objet la construction ou la transformation, l'entretien, la maintenance, l'exploitation ou la gestion d'ouvrages, d'équipements ou de biens immatériels nécessaires au service public, ainsi que tout ou partie de leur financement à l'exception de toute participation au capital. Toutefois, la loi du 28 juillet 2008 introduit une

limite par rapport au financement : le financement privé d'un projet doit être majoritaire, sauf pour les projets d'un montant supérieur à un seuil fixé par décret⁽³⁹⁾. »

Le recours par les collectivités locales au contrat de partenariat semble être particulièrement adéquat à l'éclairage public puisqu'il permet d'introduire des objectifs et clauses environnementaux, notamment sur la biodiversité. Le recours aux contrats de partenariat est de plus en plus fréquent, en tant qu'ils s'appliquent « à tous types de secteur, des infrastructures scolaires à l'éclairage public en passant par les équipements culturels de santé » (Banque de France 2013, p.2). **En 2008, deux tiers des contrats de partenariat portaient sur l'éclairage public.**

Contrairement aux DSP, les recettes d'exploitation ne proviennent pas du paiement d'un prix par la collectivité publique et donc ne correspondent pas à l'exploitation du service public en lui-même mais de l'exploitation de l'équipement.

Conformément à l'application de l'article 2 de l'ordonnance n°2004-559, le recours à un contrat de partenariat donne obligatoirement lieu à une évaluation préalable faisant apparaître :

- les motifs de caractère économique, financier, juridique et administratif du projet ;
- l'urgence ;
- le bilan coûts/avantages faisant apparaître comment le recours au contrat de partenariat serait plus favorable/intéressant que le recours à d'autres contrats de la commande publique.

Cette évaluation comporte une analyse comparative de différentes options, notamment en termes de coût global hors taxes, de partage des risques et de performance, ainsi qu'au regard des préoccupations de développement durable.

La mission d'appui aux partenariats publics privés (MAPP) peut à ce titre rendre une expertise sur l'économie générale de l'opération et aider la personne publique porteuse du projet à procéder à l'étude d'évaluation requise. On peut noter que **la ville de Valenciennes a fait valoir la dimension « développement durable » de son projet d'éclairage pour justifier le contrat de partenariat passé.**

Le pouvoir adjudicateur trouve souvent intérêt à recourir à un CP, car, à la différence des contrats passés dans le cadre des marchés publics, il permet **le préfinancement et le transfert de la maîtrise d'ouvrage au partenaire privé.**

Cet intérêt est d'autant plus vif dans le cadre d'investissements lourds ou pour une longue durée comme ceux effectués dans le cadre de la création ou de la rénovation d'un réseau d'éclairage public.

⁽³⁷⁾ Alors que dans le cadre d'une régie intéressée le délégataire perçoit une rémunération déterminée par les résultats de l'exploitation, ce n'est pas le cas pour le gérant. La rémunération que perçoit ce dernier est fondée sur des facteurs exogènes aux résultats de l'exploitation. **Ce dernier point est essentiel, car désormais, la jurisprudence classe la gérance plus généralement dans la catégorie des marchés publics et la gérance est, à ce titre, soumise au code des marchés publics.**

⁽³⁸⁾ Loi n° 2009-179 du 17 février 2009 pour l'accélération des programmes de construction et d'investissement publics et privés.

⁽³⁹⁾ Ce seuil est fixé à 40 millions d'euros hors taxe par le décret n°2009-987 du 20 août 2009. Sous ce seuil, le financement apporté *ab initio* par la ou les personne(s) publique(s) ne pourra excéder 50 % de l'investissement global à financer (MAPP, 2012).

Néanmoins, on peut noter que de 2005 à 2012, les CP passés dans l'éclairage public (CPEP) étaient d'un montant bien moindre que pour le reste des CP⁽⁴⁰⁾. La durée des contrats était également en moyenne plus courte (Le Lannier et Tra Tran, 2012). Il semble ainsi que les spécificités techniques de l'éclairage public puissent permettre de recourir à ce type de PPP de façon plus souple que pour d'autres types d'aménagements.

Tableau 7 : Durées et montants des contrats inclus dans l'enquête «Bilan et évolutions de contrats de partenariat d'éclairage public en France» (Le Lannier et Tra Tran, 2012)

variable	CPEP (43 contrats)			CP hors éclairage public (154 contrats)		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
Durée contrat (années)	6	35	17	6	45	20,5
Montant contrat (millions d'€)	0,36	37	8,5	0,36	2971	150

Par ailleurs, comme déjà évoqué (partie 1.2.1. sur les marchés publics), le CP permet de s'affranchir du principe d'allotissement, si bien que le pouvoir adjudicateur n'a plus qu'un interlocuteur unique.

Le CP permet également de transférer les risques liés à la construction et à la performance de l'ouvrage réalisé : « L'objet premier d'un contrat de partenariat est l'amélioration du service rendu aux usagers, il est donc légitime que la rémunération tienne compte des résultats obtenus en la matière. Il importe donc que ces objectifs fassent l'objet d'une négociation très poussée entre les deux partenaires. En effet, il ne s'agit pas seulement de répondre aux besoins propres de la collectivité ou à ceux des usagers, mais d'optimiser la prestation rendue. Cette logique performancielle permet d'imposer au titulaire du contrat de partenariat des objectifs de résultat, notamment en matière d'entretien et de maintenance, permettant de garantir la disponibilité de l'ouvrage objet du contrat. Le non-respect de ces objectifs conduit à une pénalisation financière du cocontractant, sous la forme d'une minoration de sa rémunération. »⁽⁴¹⁾

La répartition des risques est traitée contractuellement avec l'insertion de clauses obligatoires relatives aux risques. En principe, selon une décision d'Eurostat en 2004 (STAT/04/18), l'entreprise partenaire porte la charge des risques de construction et de disponibilité (risques liés à la performance par exemple) et le risque de demande,

trop coûteux à transférer, reste à la charge de la personne publique (la commune). (L. Richer droit des contrats administratifs LGDJ 2014).

La MAPPP (2012) fait ressortir quatre modalités de cofinancement public :

- le cas où la contribution intervient avant tout démarrage des prestations ;
- le cas où elle intervient après la réalisation des prestations mais avant tout décaissement au profit de ses prestataires ;
- le cas où elle prend la forme d'un remboursement au fur et à mesure de l'avancement des travaux par le partenaire ;
- le cas où elle est versée en une seule fois à la mise à disposition de l'ouvrage.

5.1.1.3. MARCHÉS PUBLICS VS CONTRATS DE PARTENARIAT : SYNTHÈSE

Tableau 8 : Les différences entre les marchés publics et les contrats de partenariat (© MEB-ANPCEN 2015)

	Marchés publics	Contrats de partenariat
Objet	Mono-fonctionnel (sauf pour les marchés globaux de performance)	Multifonctionnel
Durée du contrat	Courte durée (généralement)/ ponctuel	Longue durée
Préfinancement par le partenaire	Non	Oui
Paie-ments différés	Non	Oui
Service rendu à l'adminis-tration	Oui	Oui
Allotissement	Oui (sauf pour les marchés globaux de performance)	Non
Missions	Marchés successifs (sauf pour les marchés globaux de performance)	Mission globale
Paie-ment	Public	Public
Revenus tiers	Non	Oui
Partage des risques	Risque de construction	Risque de construc-tion et de performance

* Par exemple, liés à l'exploitation de l'infrastructure

⁽⁴⁰⁾ L'écart entre les moyennes reste tout de même à relativiser, le montant maximal enregistré pour le CP hors éclairage public étant extrêmement élevé (près de 3 milliards d'euros).

⁽⁴¹⁾ (www.marche-public.fr)

5.1.2 Les Contrats de performance énergétique (CPE)

5.1.2.1. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Le contrat de performance énergétique (CPE) n'est pas un contrat singulier. L'objet de ce contrat est ciblé et défini au plan communautaire par l'article 3j de la directive 2006/32 du 5 avril 2006. Il correspond à un « accord contractuel entre le bénéficiaire et le fournisseur [normalement une société de services énergétiques⁽⁴²⁾] **d'une mesure visant à améliorer l'efficacité énergétique, selon lequel des investissements dans cette mesure sont consentis afin de parvenir à un niveau d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est contractuellement défini.** »

Le droit français ne définit pas le CPE. Pourtant, la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite Grenelle I identifie le CPE comme un outil permettant d'atteindre l'objectif de réduction d'au moins 40 % des consommations d'énergie des bâtiments de l'Etat et de ses établissements publics d'ici 2020.

Seul Olivier Ortega, avocat, dans son rapport⁽⁴³⁾ au ministère de l'écologie propose la définition suivante : un CPE correspond à « tout contrat conclu par un pouvoir adjudi-

cateur et une société de services d'efficacité énergétique visant à garantir, par rapport à une situation de référence contractuelle, l'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment ou d'un parc de bâtiments, vérifiée et mesurée dans la durée par un investissement dans des travaux, fournitures ou services » (Ortega, 2011).

On peut ainsi noter qu'un contrat de performance énergétique implique des clauses relatives à des engagements de performance énergétique. La signature d'un tel contrat nécessite donc l'application de méthodes et de mesures de suivi⁽⁴⁴⁾ visant à déterminer si le contrat est rempli à hauteur des objectifs visés. En cas de non atteinte de ces objectifs, le prestataire doit indemniser le pouvoir adjudicateur. Cette indemnité correspond « à l'équivalent de tout ou partie de l'écart entre la quantité d'énergie contractuellement garantie et la quantité d'énergie effectivement consommée et mesurée » (Chong et al., 2012)⁽⁴⁵⁾. Cette indemnisation peut également prendre la forme de travaux complémentaires. Ce type de contrat apporte donc une assurance supplémentaire au pouvoir adjudicateur par rapport aux contrats précédemment évoqués.

C'est un point important de ces contrats car la raison évoquée par les collectivités pour le choix de ce type de contrat est toujours identique : la garantie de performance énergétique par le prestataire. Comme le résume

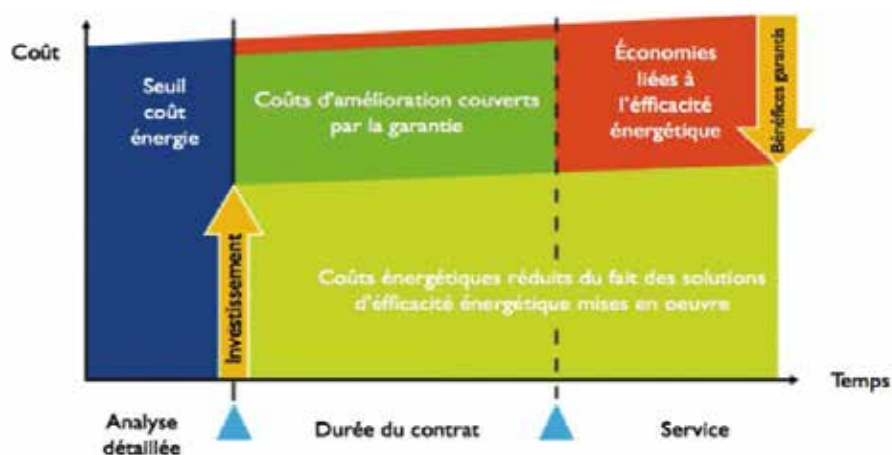
⁽⁴²⁾ RICCI N. (2014). Le contrat de performance énergétique. Energie et collectivités.

⁽⁴³⁾ ORTEGA O. (2011). Les contrats de performance énergétique. Rapport à Madame Nathalie Kosciusko-Morizet, Ministre de l'écologie, du développement durable, du transport et du logement. Lefèvre Pelletier & associés.

⁽⁴⁴⁾ Les mesures de suivi doivent être effectuées dans le cadre d'un protocole sur lequel s'accordent les deux parties. La mise en place et la mise en œuvre sont en principe à la charge du fournisseur.

⁽⁴⁵⁾ CHONG E., LE LANNIER A., STAROPOLI C. (2012). Les conditions d'efficacité des contrats de performance énergétique en France. Chaire Economie des Partenariats Public Privé. IAE de Paris.

Figure 14 : Principes du Contrat de performance énergétique (Deloitte, 2012 dans Chong, 2012)



justement A. Dupuy, chef de projet chez Cofely, (Groupe GDF Suez) « avec le CPE, on achète aussi et surtout une performance » (Zamarreno, 2011).

La définition d'Olivier Ortega reste toutefois restreinte puisque le recours au CPE ne se limite pas uniquement au bâti. Il peut être mobilisé par les clauses choisies pour la rénovation d'un réseau d'éclairage public et de l'éclairage extérieur d'une manière générale. On peut ainsi citer l'exemple pionnier du contrat de partenariat passé en 2011 entre Cofely (groupe GDF SUEZ) et la commune de Bougival. Ce contrat d'une durée de 20 ans et d'un montant de 18 millions d'euros prévoit **2,7 millions d'euros d'investissements pour la rénovation de l'éclairage public** et une réduction moyenne des consommations énergétiques de 67 % à travers :

- la **rénovation complète du parc d'éclairage public**;
- la création de 6 sites pilotes pour analyser la performance des équipements et leur fiabilité technique;
- la rénovation des signalisations lumineuses tricolores de 11 carrefours;
- la mise en lumière de 6 édifices;
- les illuminations festives de la période estivale.

Toutefois, pour les élus, le contenu des contrats à visée énergétique devraient nécessairement prévoir la cohérence de leurs choix et effets, avec les enjeux liés à la biodiversité, notamment au regard des enseignements de cette étude, et à d'autres enjeux environnementaux nationaux ou du territoire.

5.1.2.2. LES DIFFÉRENTS TYPES DE CPE

L'article 5 de la loi Grenelle 1 relatif à la rénovation du réseau d'éclairage public recommande de recourir à deux types de contrats de performance énergétique⁽⁴⁶⁾ :

- le marché global « regroupant les prestations de conception, de réalisation et d'exploitation ou de maintenance », (marché public) ;
- le contrat de partenariat.

Afin de démocratiser le recours au CPE pour les communes de tailles restreintes (petites et moyennes communes), William Azan⁽⁴⁷⁾ et Olivier Ortega « recommandent particulièrement la forme des marchés publics pour « des contrats

⁽⁴⁶⁾ Si les conditions définies par l'ordonnance n° 2004-559 du 17 juin 2004 sur les contrats de partenariat sont satisfaites, il pourra être fait appel à des contrats de partenariat pour réaliser les travaux de rénovation en matière d'économie d'énergie portant respectivement sur les 50 et 70 millions de mètres carrés de surface des bâtiments de l'Etat et de ses principaux établissements publics. Le droit de la commande publique devra prendre en compte l'objectif de réduction des consommations d'énergie visé au premier alinéa, en autorisant le pouvoir adjudicateur à recourir à un contrat de performance énergétique, notamment sous la forme d'un marché global regroupant les prestations de conception, de réalisation et d'exploitation ou de maintenance, dès lors que les améliorations de l'efficacité énergétique sont garanties contractuellement. (Loi Grenelle 1, Article 5)

⁽⁴⁷⁾ AZAN, William. «Il faut développer le recours aux marchés publics pour la passation des contrats de performance énergétique» *Le Moniteur* n°5598, 11 mars 2011.

d'un montant situé entre 2 et 20 millions d'euros, évitant une complexité et des coûts trop élevés. Le coût d'un montage en PPP est souvent rédhibitoire pour des collectivités de taille moyenne ou petite » (Zamarreno, 2011).

Pourtant, comme on a pu le voir (dans le Tableau 7, partie sur les CP), les contrats de partenariat relatifs à l'éclairage public sont déjà mobilisés pour des montants compris dans cette tranche voir même avec des montants bien inférieurs (min de 360 K€, moyenne de 8,5 M€, max de 37 M€).

5.1.2.3. DU CONTRAT DE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE AU CONTRAT DE PERFORMANCE ENVIRONNEMENTAL

Le contrat de performance énergétique a pour objectif principal d'améliorer l'efficacité énergétique. Or, les enjeux environnementaux liés à la création, la rénovation de l'éclairage et même des bâtiments ne peut se réduire à cette question. **Les enjeux environnementaux doivent être traités de façon cohérente dans leur ensemble. Ainsi, la création d'un outil « contrat de performance environnemental » permettant d'assurer l'atteinte d'objectifs mesurables de sobriété énergétique et lumineuse et d'efficacité énergétique, sans contradiction, dans le cadre de la rénovation de l'éclairage public serait intéressante à étudier.**

5.1.3 Recourir à un contrat global plutôt qu'à une passation de marchés distincts dans le cadre d'une rénovation globale

On l'a vu, deux grands types de contrats peuvent être mobilisés par les communes qui souhaitent rénover ou remplacer leur parc d'éclairage public : les marchés publics et les contrats de partenariat.

Si la collectivité souhaite passer par la procédure des marchés publics que nous qualifierons de « traditionnels » afin d'effectuer des travaux sur son parc d'éclairage et d'en déléguer l'exploitation et la maintenance, elle pourra avoir recours à « la passation de marchés distincts (marché de travaux et marché de service et de fourniture pour l'exploitation et la maintenance) » (Contrats publics, mars 2013). Cependant, cette démarche « est rarement préconisée du fait des difficultés que cela implique en termes de gestion des différents contrats et d'interface entre les multiples intervenants » (Pintat et Denis-Vernet, mars 2013).

En conséquence, il est conseillé de recourir à un contrat global. Les contrats globaux permettent de ne travailler qu'avec une seule entité simplifiant ainsi le suivi des travaux et la bonne application du contrat. Dans ce cadre, la collectivité peut faire appel aux marchés globaux de performance (REM et CREM) et aux contrats de partenariat.

Ces contrats globaux, peuvent permettre de répondre à plusieurs enjeux environnementaux : consommations d'énergie, pollution lumineuse, impacts sur la biodiversité et sur la santé, ou encore le recyclage. **Le fait de ne passer que par le biais d'un seul interlocuteur doit permettre de mener des actions cohérentes et performantes de réduction des nuisances lumineuses, les modalités de mesure de cette performance étant tout à fait primordiales et nécessitant la plus grande attention lors de leur définition.**

5.1.3.1. RECOURIR À UN MARCHÉ DE PERFORMANCE (CREM OU REM) OU À UN CONTRAT DE PARTENARIAT ?

Le prérequis pour toute réponse précise à cette question repose sur la détermination des investissements à effectuer dans le cadre du contrat et des capacités financières de la collectivité concernée. Chaque situation étant unique, il n'est ici possible que de dresser de grandes orientations en fonction des avantages et des inconvénients de chacun de ces contrats.

Le fait que les CP permettent de faire appel à un opérateur unique pour la conception, la réalisation ainsi que la gestion et l'exploitation d'un ouvrage est un argument positif souvent mis en avant. Cet avantage est désormais à relativiser avec l'apparition des CREM et des REM, car ces marchés publics permettent d'associer les missions de conception, de réalisation et d'exploitation ou de maintenance, ce qui « permet d'assurer une unité de responsabilité entre le concepteur/constructeur et l'exploitant de l'ouvrage qui appartiennent à un même groupement d'entreprises » (Pintat et Denis-Vernet, mars 2013).

En revanche, en ce qui concerne les modalités de financement, les deux types de contrats diffèrent. **A la différence des CP, les marchés globaux de performance sont des marchés publics ce qui n'autorise pas le préfinancement par le co-contractant privé, ni l'étalement des dépenses pour la collectivité.**

Par ailleurs, les CP peuvent permettre de réduire la durée de réalisation des projets, qui dans le cadre d'une maîtrise d'ouvrage public peut être fortement dépendante des disponibilités budgétaires. Les difficultés budgétaires peuvent entraîner une multiplication des phases d'opérations et retarder la réalisation des travaux. Or dans les CP, les loyers constituent « un engagement irrévocable de la puissance publique » ce qui le protège « des aléas du pilotage budgétaire annuel » (Pintat et Denis-Vernet, mars 2013).

Tableau 9 : Les contrats de partenariats : avantages et inconvénients pour les collectivités

(© MEB-ANPCEN 2015)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> → Marché global → Préfinancement par l'opérateur privé → Paiements différés possibles → Réduction des délais 	<ul style="list-style-type: none"> → Complexité du dossier / Coûts de montage élevés → Risque de perte de contrôle de l'opération

Le rapport de la Cour des comptes de février 2015 sur les PPP spécifie que la mise en œuvre des CP « peut être justifiée sous réserve de respecter certaines conditions : notamment, **un montant significatif d'investissement, une soutenabilité budgétaire démontrée et une bonne maîtrise par les collectivités des procédures d'attribution et de suivi des contrats** ». Les collectivités doivent de toute façon démontrer l'intérêt du recours au CP plutôt qu'au marché public du point de vue aussi bien technique que financier. Il est conseillé de se rapprocher de la MAPPP* pour les collectivités intéressées par cette démarche.

* La cour des comptes (février 2015) soulignent cependant « l'ambiguïté de la MAPPP dont la compétence couvre à la fois des fonctions de conseil et d'évaluation, et des missions de promotion des contrats de partenariat. » L'avis de la MAPPP reste, par ailleurs, facultatif pour les collectivités locales, contrairement aux contrats de partenariat passés par l'Etat.

Tableau 10 : Les contrats globaux de performance : avantages et inconvénients pour les collectivités (© MEB-ANPCEN 2015)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> → Marché global → Conditions financières de l'emprunt pour les collectivités plus favorables que pour les CP → Montage de dossier plus simple/moins coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> → Pas de préfinancement → Paiements différés impossibles → Le calendrier de réalisation peut être plus long

A privilégier pour les contrats dont les montants sont relativement faibles.

Faisant référence à l'utilisation des CPE par les communes de taille restreinte, William Azan* et Olivier Ortega « recommandent particulièrement la forme des marchés publics pour des contrats d'un montant situé entre 2 et 20 millions d'euros » (Zamarreno, 2011).

* AZAN, W. (11 mars 2011). Il faut développer le recours aux marchés publics pour la passation des contrats de performance énergétique. Le Moniteur n°5598.

5.1.3.2. RECOURIR AUX CONTRATS DE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE (CPE) ?

Les marchés globaux de performances et les contrats de partenariat peuvent prendre la forme de contrats de performance énergétique (MPPE : Marché public de performance énergétique ; CPPE : Contrat de partenariat de performance énergétique) si l'objet premier de la rénovation est d'améliorer l'efficacité énergétique. Pour rappel, leur utilisation est recommandée par l'article 5 de la loi Grenelle 1 (cf partie 5.1.2 sur les CPE).

Le Contrat de performance énergétique incluant une clause relative aux engagements de performance énergétique, il semble plutôt judicieux d'encourager la signature de ce type de contrat pour les acteurs publics qui assurent ainsi leurs investissements.

Le cabinet Azan Avocats Associés souligne que « le développement du Contrat de Performance énergétique doit être accompagné par un recours systématique aux mécanismes de Tiers Investissement » (Azan, 11 mai 2012).

On peut noter l'absence de référence faite à une meilleure prise en compte des enjeux liés à la sobriété énergétique et d'actions allant dans ce sens, d'autant que celles-ci sont très peu coûteuses à mettre en place et permettent de réduire la pollution et les nuisances lumineuses. Il serait ainsi judicieux d'introduire des clauses visant à assurer, au minimum, un objectif double de sobriété et d'efficacité énergétique.

La mention précédente visant à évoluer du contrat de performance énergétique au contrat de performance environnemental reste valide.

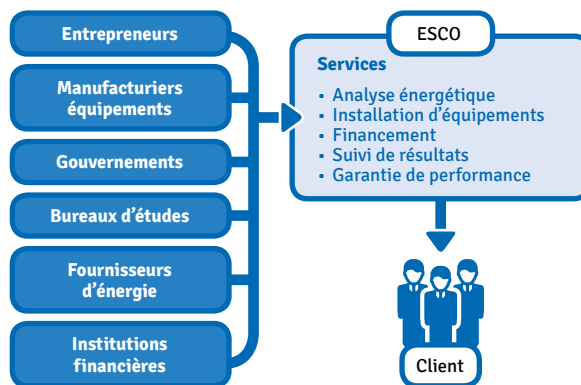
5.1.4 Le recours à des sociétés de tiers financement en éclairage public

Les notions de tiers financement et de tiers investissement sont souvent utilisées de manière confondue. Ces deux notions font souvent référence à un seul et même mécanisme dont le but est de **permettre à un acteur économique de financer ses investissements de rénovation énergétique par un tiers**. Le bénéficiaire des investissements peut ensuite rembourser en partie la société de tiers financement/investissement grâce au montant des économies d'énergie réalisées suite aux travaux. Ces économies sont garanties contractuellement.

5.1.4.1. LES ENERGY SAVING COMPANIES (ESCO)

Le modèle du tiers financeur est l'équivalent des *Energy saving Companies* (ESCO) anglo-saxonnes. En effet, « une ESCO est chargée de lever les financements nécessaires aux projets d'économie d'énergie, fait procéder à la réalisation des travaux ou à l'achat des équipements nécessaires et garantit un résultat. Les ESCO sont rémunérées par une rémunération fixe (« *Business Cost* ») et une rémunération variable (« *Shared Savings Agreement* ») » (Ortega, 2011).

Figure 15 : Le modèle ESCO (IEPF, 2002, dans Quicheron, 2005)



5.1.4.2. TIERS FINANCEMENT ET TIERS INVESTISSEMENT : DÉFINITIONS

Il existe des tentatives de définition qui ont le mérite de définir précisément l'ensemble de la démarche (Reinmann et Ortega, 2013) :

► « le tiers financement de la rénovation énergétique est un modèle économique qui consiste à proposer une offre intégrée, incluant le financement des travaux, dans une approche globale (**l'efficacité énergétique étant un élément parmi d'autres**) et incluant une gestion technique et opérationnelle des projets, y compris postérieurement aux travaux. Le tiers financement stricto sensu consiste à organiser le montage financier complet, comprenant toutes les ressources possibles (prêts bancaires classiques, prêts bonifiés par l'Etat, subventions) au-delà de la capacité d'autofinancement du maître d'ouvrage, **avec éventuellement une partie de tiers investissement.**

► « le tiers investissement de la rénovation énergétique est un modèle économique **qui consiste à allouer des capitaux à des projets de rénovation énergétiques, en contrepartie de créances garanties sur le montant des économies d'énergie futures**⁽⁴⁸⁾ réalisées dans le bâtiment, car celles-ci permettront un retour sur investissement. Le tiers-investissement est un cas particulier de tiers-financement dans lequel le propriétaire ne finance pas les investissements alors que c'est le cas dans la plupart des solutions en tiers-financement. »

En ce sens, le tiers investissement s'inscrit forcément dans une démarche de tiers financement. Il permet de dépasser les problèmes de trésorerie, le propriétaire n'ayant pas besoin de s'endetter directement auprès d'un établissement financier. Dans ce cadre, les versements de remboursement du bénéficiaire « intègrent une partie des économies réalisées grâce aux actions mises en œuvre » (Ortega, 13 octobre 2014).

⁽⁴⁸⁾ Dans la réalité il s'agit plutôt de modéliser le montant du loyer sur les économies d'énergie planifiées. Celles-ci viennent alimenter les capacités de remboursement de la collectivité.

Une société de tiers investissement (STI) doit ainsi s'appuyer sur une triple compétence. Elle doit être :

- Un ensemble de compétences stratégiques, financières, techniques, juridiques et organisationnelles ;
- Capable de structurer l'offre financière de l'opération ;
- Apporter à ses clients la garantie de performance énergétique.

Ceci devrait conduire les élus, dans un souci de cohérence, à choisir des ensembles à même d'intégrer entre eux différents enjeux environnementaux contemporains.

5.1.4.3. LE TIERS FINANCEMENT EN DROIT FRANÇAIS

A noter : Le droit français n'autorise pas le mécanisme de tiers financement en ce qui concerne les marchés publics. En effet, en raison de la prohibition des clauses de paiement différé présent dans l'article 96 du Code des Marchés Public, « la personne publique ne peut confier à un Tiers investisseur le soin de pré-financer les travaux d'économie d'énergie. (...) Seul le Contrat de Partenariat permet de procéder sans risque juridique à un tel remboursement sur les économies futures de l'investissement pré-financé par un tiers, objectif auquel ne peut répondre un simple Marché Public » (Azan, 11 mai 012).

L'article L 381-1 du livre III du code de la construction et de l'habitation définit les nouvelles dispositions relatives au tiers-financement :

« Le tiers-financement, dans le champ d'opérations de rénovation de bâtiments, est caractérisé par **l'intégration d'une offre technique**, portant notamment sur la réalisation des travaux dont la finalité principale est la diminution des consommations énergétiques, à un service comprenant **le financement partiel ou total de la dite offre, en contrepartie de paiements échelonnés, réguliers et limités dans le temps (...)**. »

Ce mécanisme permet ainsi aux maîtres d'ouvrage de pouvoir effectuer des travaux de rénovation énergétique **en basant le versement du « loyer » sur les économies d'énergie réalisées et garanties par la société de tiers-financement.**

En d'autres termes, le tiers financement peut être intégré à un Contrat de Performance Energétique passé en contrat de partenariat. Le calcul du montant et de la période de remboursement est ainsi modélisé à partir des économies d'énergie réalisées et des capacités financières du maître d'ouvrage.

Cependant, le tiers financement doit permettre d'aller au-delà du « simple » contrat de partenariat en permettant d'organiser le financement de projets sur lesquels les établissements financiers classiques hésitent fortement à investir.

Tableau 11 : Intérêts et limites du tiers financement et du tiers investissement (éléments issus de Ortega et Reinmann, 2013)

<i>Intérêts intrinsèques</i>	<i>Intérêts structurels</i>	<i>Limites</i>
Permet de lever les barrières de trésorerie : - Le tiers investissement : permet de lever la dette. - Le tiers financement : Il y a endettement du propriétaire mais ce mécanisme peut permettre d'accroître des ratios d'endettement* acceptables, eu égard à la qualité de la créance. Facilite la prise de décision des maîtres d'ouvrage.	Permet d'organiser l'investissement dans la rénovation énergétique à moyen et long terme**. Encourage les renouvellements performants du point de vue énergétique (consommation) et environnemental (diminution des nuisances) Le tiers financement est indispensable pour permettre la création et la structuration de créances de qualité.	Ne change pas l'équilibre économique intrinsèque des projets. Ne permet pas davantage de se prémunir contre les risques d'insolvabilité ou de "mauvais payeurs".

* Le ratio d'endettement permet de comparer les dettes aux actifs = (Total des dettes/Total des actifs) x 100

** En effet, à propos de la rénovation énergétique du bâti Ortega et Reinmann (2013) soulignent que le fait de développer le tiers investissement pourrait permettre de renforcer la confiance financière et de renforcer la filière car « actuellement les investisseurs, qu'ils soient institutionnels ou privés, ne considèrent pas que l'efficacité énergétique soit un investissement de qualité d'autant qu'il est à maturité longue. »

5.1.4.4. QUELLES PERSPECTIVES POUR L'ÉCLAIRAGE PUBLIC ?

Pour le moment, la possibilité de recourir au tiers financement n'a pas été clairement étudiée pour la rénovation de l'éclairage public en France (alors qu'elle existe dans d'autres pays européens, comme l'Autriche). Une proposition d'amendement d'octobre 2014, portant sur la loi de transition énergétique proposait d'introduire la possibilité de recourir à ce dispositif dans ce domaine.

Un tel mécanisme semble pourtant intéressant pour tous les domaines dans lesquels des économies d'énergie sont réalisables et là où une approche globale est souhaitable. En effet, la collectivité concernée et le tiers financeur doivent mener une réflexion en amont du projet, permettant de définir plus globalement et de façon plus prospective les travaux et bénéfices attendus.

Les modélisations sur les économies d'énergie semblent d'ailleurs plus aisées à réaliser en matière d'éclairage public car le risque d'effet rebond⁽⁴⁹⁾ est moindre par rapport au bâti résidentiel par exemple d'autant plus que le potentiel d'économies d'énergie permet d'envisager un remboursement rapide des investissements.

Les sociétés de tiers financement auraient donc un intérêt d'autant plus grand à intervenir sur ce marché dès lors que le législateur leur en donnerait la possibilité.

Le recours à un tel mécanisme peut favoriser la rénovation de l'éclairage des communes dont les capacités financières sont limitées et pour lesquelles l'accès au prêt bancaire reste difficile, et ce, en réduisant potentiellement le besoin de prélèvement sur les foyers.

Les investissements effectués en matière d'efficacité énergétique, ne doivent toutefois pas inciter à éclairer plus.

A l'image des Energy Saving Companies (ESCO) on peut imaginer que des Biodiversity and Energy Saving Companies (BESCO) [des sociétés de services énergétiques et écologiques] puissent voir le jour. Ces sociétés de tiers financement pourraient ainsi favoriser le développement de projets responsables permettant d'associer une double compétence écologique et énergétique. En effet, les établissements financiers seraient sans doute extrêmement frileux à l'idée d'investir sur de tels projets sans la création et la structuration de créances de qualités.

5.2 Les aides et dispositifs publics

5.2.1 Les aides de l'ADEME

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est opérateur de l'Etat pour accompagner la transition écologique et énergétique. Dans ce cadre, elle mène diverses missions de communication, de sensibilisation, d'accompagnement auprès des particuliers, des entreprises et des communes afin de les accompagner vers une meilleure maîtrise des consommations énergétiques. L'agence intervient sur de nombreux domaines mais **l'éclairage public représente une part très réduite de ses activités et son mandat ne la conduit pas à agir spécifiquement sur les enjeux de biodiversité.** Afin de réduire les consommations énergétiques elle dispose de fonds destinés à aider les communes dans leur démarche de rénovation et/ou de meilleure gestion de leur éclairage public. Bien que surtout tournés vers des actions d'efficacité énergétique, les projets aidés ou accompagnés par

l'ADEME incluent désormais quelques recommandations visant à des actions permettant de réduire la pollution lumineuse à travers des réductions des durées d'éclairage, l'installation de détecteurs de présences, ou encore, dans certaines de ses recommandations, l'installation de candélabres avec un ULOR (Upward Light Output Ratio) nul. C'est le cas par exemple du dispositif de soutien de l'ADEME Poitou-Charentes pour les communes de moins de 10 000 habitants de 2014 qui souligne que l'objectif principal est d'encourager « la réduction des consommations énergétiques, mais également la diminution de la pollution lumineuse. » On peut regretter l'absence de référence à la sobriété énergétique et lumineuse même si l'enjeu santé et biodiversité est mentionné dans la présentation du dispositif. Ce dispositif local vient prolonger l'aide nationale lancée en 2012 sur l'ensemble du territoire.

L'aide nationale de l'ADEME pour les communes de moins de 2000 habitants, une opération à reconduire dans de nouvelles conditions :

En 2012, l'Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) s'est vue dotée d'une enveloppe de plus de 20 millions d'euros destinée à subventionner la rénovation de l'éclairage public des communes de moins de 2 000 habitants. Au total, 65 200 points lumineux ont été rénovés sur 2 082 communes regroupant 1,7 millions d'habitants. Ce chiffre est à rapporter aux 31 539 communes de moins de 2000 habitants, représentant 24,4 % de la population française (DGCL 2014). En tout, ce sont 21 millions d'euros d'aides pour un investissement des communes de 55 millions d'euros.

Ces opérations qui ont été engagées avaient un objectif de réduction des consommations d'au moins 50 % (Facteur 2), voire facteurs 3 ou 4, le forfait par point lumineux étant fonction du niveau des opérations engagées comme décrit dans le tableau suivant.

Figure 16 : Les aides de l'ADEME en fonction des objectifs de réduction de consommation d'électricité (ADEME, 2011)

Opération Facteur 2	
Objectif prévisionnel de réduction des consommations	Forfait par point lumineux*
Réduction ≥ 50 % (facteur2)	360 € HT

* Le taux d'aide moyen correspondant a été évalué à 30 %

Opérations exemplaires Facteur 3 et Facteur 4		
Objectif prévisionnel de réduction des consommations	Taux d'aide maximum (%)	Plafonds d'aide par point lumineux
Réduction ≤ 2/3 (facteur 3)	40 %	1600 € HT
Réduction ≤ 75 % (facteur 4)	50 %	3000 € HT

⁽⁴⁹⁾ Façon par laquelle les gains potentiels d'économie d'énergie peuvent être limités lorsque les ménages ou organisations profitent des avancées techniques et technologiques pour consommer davantage.

Cette aide au point lumineux incluait l'ensemble « source, luminaire, candélabre, ballast ». **Il faut noter que le nombre de foyers lumineux subventionnés était au maximum de 50 par commune et que ces aides n'étaient pas cumulables avec les certificats d'économie d'énergie** (point suivant).

Ces aides auraient, selon l'Ademe, permis d'accélérer considérablement le retour sur investissement des projets visant à remplacer et/ou moderniser les points lumineux. L'ADEME souligne ainsi que sur une ville ayant investie 80 303 € dans la rénovation de 42 points lumineux, et ce, dans un objectif de réduction des consommations d'énergie selon un facteur 3 ou 4, les aides de l'ADEME (35 770 €, soit 44,5 % du coût total du projet) ont permis de réduire le temps de retour sur investissement de 20 ans (24 ans contre 44 ans sans les aides).

Si cette opération devait être renouvelée, les dispositifs publics étant rares, elle devrait particulièrement l'être dans un cadre plus concerté et plus intégrateur de l'ensemble des externalités de l'éclairage public dont les enjeux de santé liés à l'environnement, à la biodiversité, la pollution et les nuisances lumineuses. Le versement de ces aides devrait également mettre davantage l'accent sur les enjeux de sobriété énergétique par les usages. Enfin, les données devraient être mises à disposition pour une analyse partagée permettant d'assurer collectivement que le surcoût d'investissement engagé pour l'atteinte des facteurs 3 et 4 est justifié dans cette approche plus globale.

Il peut être noté que l'Ademe ne produit pas de bilan d'atteinte de l'objectif légal de réduction et suppression des nuisances lumineuses.

5.2.2 Les Certificats d'Economie d'Energie (CEE) un dispositif dédié à l'efficacité énergétique

Créés par la loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique (POPE), du 13 juillet 2005, les Certificats d'Economie d'Energie, ont été instaurés pour inciter les fournisseurs d'énergie à promouvoir les actions en faveur de l'efficacité énergétique auprès de leurs clients. Ces fournisseurs d'énergie, appelés aussi les obligés⁽⁵⁰⁾, doivent répondre à des obligations triennales de réalisation d'économie d'énergie⁽⁵¹⁾ :

- 1^{ère} période, du 1^{er} juillet 2006 au 1^{er} juillet 2009 : 54TWh cumac⁽⁵²⁾ ;
- 2^{ème} période, début 2011 - fin 2014 : 345 TWh cumac ;
- 3^{ème} période, début 2015 : 700 TWh cumac pour contribuer à la réalisation de l'objectif, fixé par l'article 7 de la directive 2012/27/UE du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique (1,5 % d'économies d'énergie par an, jusqu'en 2020 par rapport aux volumes d'énergie vendus de 2010 à 2012).

3 milliards d'euros devraient ainsi être consacrés aux économies d'énergie par les obligés.

⁽⁵⁰⁾ Les obligés correspondent aux fournisseurs d'énergies qui ont donc l'obligation de faire des efforts allant dans le sens des économies d'énergie. On y retrouve les vendeurs d'électricité, de gaz, de GPL de chaleur et de froid par réseau, les vendeurs de fioul domestique et les metteurs à la consommation de carburant pour automobiles.

⁽⁵¹⁾ Pour contribuer à la réalisation de l'objectif, fixé par l'article 7 de la directive 2012/27/UE du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique : 1,5 % d'économies d'énergie par an, jusqu'en 2020 par rapport aux volumes d'énergie vendus de 2010 à 2012. 3 milliards d'euros devraient ainsi être consacrés aux économies d'énergie par les obligés.

⁽⁵²⁾ « Une formule de calcul des Certificats d'Économies d'Énergie est donnée dans chaque fiche d'opération standardisée. L'unité utilisée est le 'kilowatt heure cumac', défini par l'économie d'énergie réalisé (kWh) en fonction de la durée de vie du produit et d'un coefficient d'actualisation financier et technique lié à l'amélioration de la référence dans le temps (cumac). » (Etholia, 2014)

Tableau 12 : Bilan des aides de l'ADEME pour les communes de moins de 2000 habitants (Adapté de ADEME Basse Normandie, 2013)

	Facteur 2	Facteur 3 et 4
Nombre de communes	2 031	51
Nombre de point lumineux	63 100	2 100
Investissements	51,2 M€	4,1 M€
Aides ADEME	19,2 M€	1,8 M€
% Aides	37,5 %	43,9 %
Coût par point lumineux	811 €	1 952 €
GWh économisés	19,55 GWh	940 MWh
Economie de puissance (MW)	4,52 MW	187 kW
Energie économisée par point*	310 kWh	448 kWh

* Voir note de bas de page n°52

On peut noter que l'Ademe ne produit aucun bilan de ses aides d'atteinte de l'objectif légal de réduction et suppression des nuisances lumineuses.

Les obligés ne sont pas les seuls à pouvoir acquérir des CEE. **Les collectivités territoriales, les bailleurs sociaux, l'ANAH⁽⁵³⁾, les sociétés publiques locales (SPL) et sociétés d'économies mixtes (SEM) proposant le tiers-financement peuvent y prétendre.** On les appelle les éligibles.

Trois types d'actions peuvent donner lieu à l'obtention de certificats :

- la réalisation d'opérations relevant d'un catalogue d'opérations standardisées répertoriées sous forme de fiches dont la liste est fixée par arrêté (voir encadré suivant) ;
- la valorisation d'opérations spécifiques correspondant à des opérations plus complexes ou non génériques ;
- le financement de programmes, faisant l'objet d'un arrêté, correspondant à des actions organisées de maîtrise de l'énergie (information, formation, innovation, lutte contre la précarité énergétique).

Pour faciliter les transactions, le volume minimal d'économies d'énergie ouvrant droit au dépôt d'une demande de Certificats d'économie d'énergie est de 1 million de kWh cumac, soit 1 GWh cumac.

Au 30 novembre 2014 et depuis son lancement, le mécanisme avait permis de délivrer un volume de 593,2 TWh cumac : **561,6 TWh cumac ont été obtenus dans le**

cadre, d'opérations standardisées (dont 0,7 % dans le secteur de l'éclairage), 22,3 TWh cumac via des opérations spécifiques et 9,2 TWh cumac via des programmes d'accompagnement (Medde, décembre 2014).

5.2.2.1. L'OBTENTION DE CEE DANS LE CADRE DE LA RÉNOVATION DE L'ÉCLAIRAGE PUBLIC :

Dans le cadre de la rénovation de son parc d'éclairage public, une collectivité - ou le syndicat d'énergie ou d'électrification - peut obtenir des CEE de plusieurs façons :

- Suite à la réalisation de travaux dans le respect des règles de la commande publique, le marché de travaux passé ne prévoyant pas contractuellement l'acquisition et la valorisation de CEE. La collectivité doit ainsi faire une demande de CEE a posteriori auprès du Pôle national des certificats d'économie d'énergie (PNCEE).
- Indépendamment de tout marché de travaux, la collectivité peut conclure un partenariat avec un obligé afin que celui participe financièrement au financement des travaux en échange de la cession des CEE qui seront obtenus.
- La collectivité peut également valoriser les CEE dans le cadre de la procédure de passation de marché. Deux solutions sont alors envisageables :

- la valorisation des CEE comme élément de prix du marché est expressément prévu dans les documents de la consultation ;
- la collectivité autorise les variantes⁽⁵⁴⁾ comme définie à l'article 50 du code de marchés publics.

5.2.2.2. LES CEE : UN OUTIL ENVIRONNEMENTAL ?

On peut penser que l'obtention puis la vente de CEE pourraient être intéressante financièrement. Néanmoins, si l'on considère le prix moyen d'un CEE (0,0037 € kWh cumac selon le registre EMMY, mais cette valeur n'est pas fixe car échangée sur un marché), le montant du paiement issu de la vente de ces CEE resterait relativement marginal.

En reprenant les chiffres du bilan des aides affectées par l'ADEME⁽⁵⁵⁾ au niveau national comme base de calcul, on observe que les primes CEE potentielles ne peuvent accéder qu'à la marge le retour sur investissement dans l'éclairage public. En effet, le montant des CEE ne repré-

⁽⁵³⁾ ANAH : Agence nationale de l'habitat. C'est un établissement public d'État qui pour mission de mettre en œuvre la politique nationale de développement et d'amélioration du parc de logements privés existants. Pour atteindre cet objectif, elle encourage la réalisation de travaux en accordant des aides aux propriétaires occupants, aux propriétaires bailleurs de logements locatifs et aux copropriétaires

Liste des cinq opérations ouvrant droit à l'acquisition de CEE dans le domaine de l'éclairage extérieur pour la troisième période :

- ➔ Système de régulation de tension en éclairage extérieur
- ➔ Système de maîtrise de la puissance réactive en éclairage extérieur
- ➔ Système de variation de puissance en éclairage extérieur
- ➔ Rénovation d'éclairage extérieur*
- ➔ Horloge astronomique pour l'éclairage public

Par ailleurs, deux fiches n'ont pas été révisées pour la troisième période et sont donc « suspendues » :

- ➔ Installation de diodes électroluminescentes (DEL) dans la signalisation lumineuse tricolore
- ➔ Rénovation d'une illumination de mise en valeur

* A noter la fiche « rénovation d'éclairage extérieur » fait partie des 50 CEE les plus utilisés.

⁽⁵⁴⁾ « La variante est une offre, équivalente et alternative à la solution de base, que propose le candidat. Elle peut consister en une modification de certaines des spécifications techniques décrites dans le cahier des charges ou, plus généralement, dans le dossier de consultation. Elle peut aussi consister en un aménagement des conditions financières du marché. La variante permet ainsi aux candidats de proposer à la collectivité une solution ou des moyens pour effectuer les prestations du marché, autres que ceux fixés dans le cahier des charges. » (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 12 novembre 2013)

⁽⁵⁵⁾ Les aides de l'ADEME ne sont pas cumulables avec les CEE mais les chiffres issus de ce bilan fournissent des informations intéressantes pour quantifier les montants potentiels qui peuvent être obtenus dans le cadre de projets de rénovation de l'éclairage extérieur.

sente qu'une part relativement faible du montant total des investissements. En effet, en reprenant les chiffres du bilan des aides affectées par l'ADEME au niveau national avec la moyenne de kWh économisés par point lumineux et par an, ainsi qu'une durée de vie de 30 ans et un coefficient d'actualisation de 4 % comme bases de calcul, on se rend compte que **les primes CEE potentielles ne peuvent accélerer qu'à la marge le retour sur investissement dans l'éclairage public**. En effet, le montant des CEE ne représentent qu'une part relativement faible du montant total des investissements (**inférieure à 3 % cf Tableau 13**). Néanmoins, le CEE portant l'installation d'horloges astronomique a une valeur environ équivalente à 15 % du prix d'achat unitaire.

On peut, dès lors, parler d'effet d'aubaine et s'interroger sur la finalité environnementale, énergétique ou financière des CEE pour l'éclairage, car le montant issu de la vente de CEE obtenus ne peut être un facteur déclencheur à l'initiative d'un projet de rénovation de l'éclairage extérieur. D'ailleurs, le rapport de la cour des comptes de 2013 portant sur les économies d'énergie soulignait que « les études disponibles, qui ne sont que partielles, montrent que les certificats ne sont souvent pas à l'origine de la décision de faire des travaux ».

Le rapport CGEDD, IGF et CGEIET de 2014 souligne que « *L'effet des outils publics d'efficacité énergétique n'est pas mesuré par l'administration* ».

Par ailleurs, d'une façon générale, il apparaît qu'il existe « une forte hétérogénéité du taux de rentabilité interne [qui varie de -10 % à +15 %] selon les opérations [éligibles aux CEE], et des temps de retour sur investissement peu réalistes, car supérieurs à la durée de vie de l'équipement » (CGEDD, IGF et CGEIET, 2014). De plus, le dispositif des CEE permet « en théorie de laisser les obligés s'orienter vers les économies d'énergie les plus faciles à obtenir à moindre coût » (CGEDD, IGF et CGEIET, 2014).

En résumé, l'intérêt financier des CEE reste marginal d'autant que la finalité énergétique de ce dispositif semble contestée. En effet, le rapport de l'Inspection générale des finances de 2014 souligne « **que les différents outils publics d'efficacité énergétique (les CEE, le CIDD⁽⁵⁶⁾ et l'éco-PTZ⁽⁵⁷⁾ étant indissociables dans l'analyse) ont eu un effet très inférieur à l'impact attendu sur la consommation finale.** »

De fait, on ne peut faire de ce dispositif un levier d'action en faveur d'un éclairage à approche durable, à moins que les incitations soient renforcées et orientées vers un objectif de sobriété énergétique et de réduction de la pollution et des nuisances lumineuses.

⁽⁵⁶⁾ Le crédit d'impôt développement durable est accordé jusqu'au 31 décembre 2015 pour les rénovations lourdes d'isolation thermique de l'habitat, les chaudières à condensation et les équipements de production d'énergie utilisant une source d'énergie renouvelable

⁽⁵⁷⁾ L'éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ) permet de financer des travaux améliorant la consommation énergétique des logements.

Tableau 13 : CEE qui auraient pu être potentiellement délivrés dans le cadre de la rénovation en Facteur 2 et en Facteur 3 et 4 des communes de moins de 2 000 habitants aidées par l'ADEME (© MEB-ANPCEN 2015)

(durée de vie 30 ans ; coefficient d'actualisation : 4 %) (Calculs réalisés par MEB-ANPCEN, concernant les CEE potentiels)

	Facteur 2	Facteur 3 et 4
Nombre de communes	2 031	51
Nombre de point lumineux	63 100	2 100
Investissements	51,2 M€	4,1 M€
Aides ADEME	19,2 M€	1,8 M€
% Aides	37,5 %	43,9 %
Coût par point lumineux	811 €	1 952 €
GWh économisés	19,55 GWh	940 MWh
Economie de puissance (MW)	4,52 MW	187 kW
Energie économisée par point*	310 kWh	448 kWh
Base de calcul pour connaître le montant des CEE**	5572 kWh cumac	8050 kWh cumac
Prix CEE (moyenne mensuelle 2013 hors volume)	0.0035 €/KWh cumac	0.0035 €/KWh cumac
CEE potentiels par point	19,50 €	28,17 €
Part CEE potentiels	2,4 %	1,4 %

* « Une formule de calcul des Certificats d'Économies d'Énergie est donnée dans chaque fiche d'opération standardisée. L'unité utilisée est le 'kilowatt heure cumac', défini par l'économie d'énergie réalisée (kWh) en fonction de la durée de vie du produit et d'un coefficient d'actualisation financier et technique lié à l'amélioration de la référence dans le temps (cumac). » (Etholia, 2014)

** Le gain (kWh cumac) est égal au Gain annuel (kWh) x Durée de vie du produit installé x Coefficient d'actualisation (4 %). Le montant de la prime dépend directement du montant de kWh cumac (Avec durée de vie conventionnelle fiche rénovation éclairage extérieur = 30 ans ; Taux d'actualisation = 4 %)



© Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center - <http://eol.jsc.nasa.gov/>

5.2.3 Les subventions des syndicats d'électricité/d'énergie

5.2.3.1. LES SYNDICATS D'ÉLECTRICITÉ, D'ÉNERGIE OU D'ÉLECTRIFICATION ?

Les syndicats d'électricité ou d'énergie sont des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI⁽⁵⁸⁾).

A l'origine ces syndicats ont été créés pour favoriser l'électrification des campagnes. Le réseau public distribution d'électricité appartient aux autorités concédantes (communes ou EPCI). ErDF est concessionnaire de 95 % du réseau (5 % concédés à des entreprises locales de distribution) sur le territoire.

Les contrats de concession prévoient que le concessionnaire (ErDF) paie les équipements nécessaires à l'exploitation du service⁽⁵⁹⁾. Dans ce cadre, les modèles de cahier des charges élaborés par la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR) prévoient le versement de trois redevances par le concessionnaire (ErDF) :

- La redevance de fonctionnement, dite « R1 », qui a pour objet de financer les dépenses annuelles de l'autorité concédante pour l'accomplissement de sa mission (contrôle de l'exécution de la concession, conseils aux usagers, coordination des travaux etc.).

- La redevance d'investissement, dite « R2 », versée par le concessionnaire (ErDF) en contrepartie des investissements réalisés par le concédant (une commune ou un EPCI) sur des installations du réseau et/ou sur les installations d'éclairage public. [Le calcul de la redevance peut être négocié avec le concessionnaire. Ainsi, les investissements réalisés sur les installations d'éclairage public peuvent parfois ne pas être compris dans le mode de calcul.]

- La redevance d'intégration des ouvrages dans l'environnement. » (Cour des comptes, Février 2013).

Les syndicats peuvent aussi mobiliser d'autres sources de financement pour mener à bien leurs différentes missions, tels que :

- la taxe syndicale sur les consommations finales d'électricité au titre de l'article L 5212-24 du Code général des collectivités territoriales (CGCT) ;

- les versements du Fonds de Compensation de la Taxe sur la Valeur Ajoutée (FCTVA) ;

- la contribution des membres, dans les conditions fixées par l'organe délibérant du Syndicat, aux dépenses correspondant à l'exercice des compétences transférées.

Au fur et à mesure, de nouvelles compétences sont venues s'ajouter à la mission principale des différents syndicats. Ils peuvent, par exemple, être compétents pour la distribution du gaz, la télécommunication, les énergies renouvelables, la gestion de l'énergie ou encore en matière d'éclairage public.

⁽⁵⁸⁾ EPCI : Etablissement public de coopération intercommunal. Ce sont des regroupements de communes ayant pour objet l'élaboration de « projets communs de développement au sein de périmètres de solidarité ». Ils sont soumis à des règles communes, homogènes et comparables à celles de collectivités locales. Les communautés urbaines, communautés d'agglomération, communautés de communes, syndicats d'agglomération nouvelle, syndicats de communes et les syndicats mixtes sont des EPCI (insee.fr).

⁽⁵⁹⁾ L'Etat et les collectivités territoriales, ainsi que leurs établissements publics, peuvent concéder la réalisation des opérations d'aménagement prévues par le présent code à toute personne y ayant vocation. (...) Le concessionnaire assure la maîtrise d'ouvrage des travaux et équipements concourant à l'opération prévus dans la concession, ainsi que la réalisation des études et de toutes missions nécessaires à leur exécution. (Article L300-4 du code de l'urbanisme).

5.2.3.2. LA COMPÉTENCE ÉCLAIRAGE PUBLIC EST OPTIONNELLE

La compétence éclairage public est optionnelle. Lorsqu'une collectivité adhère à un syndicat d'énergie, elle a ainsi la possibilité de transférer la compétence de la maintenance de ses installations (moyennant une part fixe calculée en fonction du nombre points lumineux et un forfait par point lumineux⁽⁶⁰⁾). Les montants versés par les communes adhérentes doivent permettre de financer la grande partie des besoins de maintenance des équipements.

Par ailleurs, la commune a la possibilité de transférer en plus de la compétence « maintenance », sa compétence de maître d'œuvre des travaux.⁽⁶¹⁾ **Les élus dans ce cas, doivent s'assurer en amont de la volonté d'une approche globale du syndicat et de sa compétence quant aux enjeux environnementaux de l'éclairage public, pour qu'ils soient effectivement pris en compte, au delà de l'approche technico-économique généralement privilégiée.** Dans le cas où le recours à un CP est retenu les syndicats doivent pouvoir assurer le montage du contrat et le bon déroulement de son application, qu'une commune seule n'aurait pas forcément les moyens et les compétences nécessaires de faire de façon optimale.

Les travaux d'investissement restent à la charge de la collectivité adhérente. Cependant, les syndicats peuvent subventionner ces travaux neufs ou de rénovation (se reporter au 5.3.3 pour plus d'informations)

Figure 17 : Exemple de subventions accordées pour les travaux de rénovation par le Syndicat départemental d'énergie 35

Maîtrise d'ouvrage	Communes rurales	Communes urbaines
	Commune ou EPCI	
Montant de l'aide du SDE35	50 % modulés*	15 % fixe
Plancher / Plafond de l'aide	50 % / 80 %	-

* Afin d'assurer une péréquation entre communes du département, le SDE35 utilise le taux de modulation fixé par le conseil général d'Ille-et-Vilaine pour définir le montant de certaines aides financières. Celui-ci est basé sur 8 critères qui servent à favoriser les territoires les moins dotés et les plus à l'écart du développement économique et social. Quel que soit le taux de modulation, le total des aides publiques est toujours plafonné à 80 % de la dépense.

© MEB-ANPCEN 2015

5.2.3.3. LES SYNDICATS PEUVENT ÊTRE DES PORTEURS DE PROJETS D'ÉCLAIRAGE AVEC UNE APPROCHE PLUS GLOBALE

Les communes adhérentes qui transfèrent leurs compétences en matière d'éclairage extérieur doivent pouvoir attendre des syndicats des conseils techniques et économiques, **comme des conseils pour la prévention et la réduction de l'ensemble des impacts de l'éclairage extérieur, notamment les enjeux de sobriété énergétique et de réduction des nuisances lumineuses.**

De même, le recours croissant aux réserves publiques, parlementaires ou ministérielles, pour financer des projets d'éclairage doit intégrer cette approche globale de l'éclairage extérieur communal.

5.3 Les pistes pour une prise en compte globale des externalités de l'éclairage

Afin de répondre aux enjeux environnementaux et économiques qui l'entoure, **le secteur de l'éclairage, comme nombre d'autres secteurs et activités, est appelé à proposer des modes d'actions plus responsables prenant en compte de façon large ses externalités.** Les communes au moment de leurs choix pourront privilégier des approches plus globales.

5.3.1 Les contrats globaux : opportunité pour des projets écologiques cohérents aux performances garanties

L'analyse effectuée permet de faire ressortir deux contrats présentant un intérêt particulier pour une prise en compte plus globale des enjeux énergétiques, santé et biodiversité de l'éclairage public :

- les marchés globaux de performance (CREM ou REM) ;
- le contrat de partenariat.

En effet, ces contrats peuvent contribuer à faciliter le montage de projets cohérents du fait de la présence d'un interlocuteur unique. **Les élus ont ainsi la possibilité de s'emparer des opportunités offertes par ces contrats pour fixer des objectifs précis et mesurables en matière de réduction des consommations énergétiques et lumineuses, et d'incidences écologiques (pollutions et nuisances lumineuses, écoconception, économie de matières premières et terres rares, recyclage)** à l'image de ce qu'autorisent les contrats de performance énergétique (CPE) pour l'efficacité énergétique.

⁽⁶⁰⁾ Par exemple, en 2013, le syndicat départemental d'énergie 35 (Sde35) demandait à ses communes adhérentes de participer à hauteur de 21,86 € par point lumineux pour les communes rurales et 27,32 € pour les communes urbaines.

⁽⁶¹⁾ En 2011, 60 % des communes avaient transférées leur compétence éclairage à un syndicat (Czajka, Mars 2011).

Les clauses actuellement fixées à ces contrats restent insuffisantes pour assurer la réalisation d'un projet d'éclairage responsable, tant sur le point de la sobriété énergétique que sur la réduction de la pollution et des nuisances lumineuses. Les CPE doivent mieux relier les objectifs énergétiques et les incidences de la pollution lumineuse.

5.3.2 Le tiers financement : un mécanisme à expérimenter

Le tiers financement peut permettre une approche globale innovante et servir de levier d'action intéressant dans l'objectif d'une rénovation de l'éclairage public. En effet, dans le cadre de ce mécanisme, le bénéficiaire peut rembourser en partie la société de tiers financement/investissement grâce au montant des économies d'énergie réalisées suite aux travaux. Or, une rénovation réalisée de façon rationnelle doit permettre la réalisation d'économies d'énergie conséquentes autorisant un remboursement rapide. Cette affirmation est d'autant plus vraie sur l'éclairage public, le potentiel d'économies d'énergie étant particulièrement important. **Le tiers financement représente ainsi une alternative intéressante au recours à la dépense publique financée par la taxation locale des citoyens.**

Par ailleurs, pour les communes aux capacités financières réduites, notamment en milieu rural, le recours à un tiers financeur intéressé est utile pour investir sur un projet de rénovation à double objectifs, énergétique et écologique, en s'appuyant sur un tiers ensemblier, à même de structurer l'offre financière de l'opération, garantissant des créances de qualité, et d'apporter aux communes une garantie de performance, pour organiser le financement de projets sur lesquels les établissements financiers classiques hésitent à investir.

Ainsi, la possibilité de recourir à ce mécanisme pour l'éclairage public mérite d'être approfondie afin d'encourager l'émergence de sociétés de tiers financement favorisant le développement de projets responsables permettant d'associer une double compétence écologique et énergétique.



5.3.3 Les aides publiques : elles pourraient être davantage orientées vers les objectifs légaux de réduction de la pollution et des nuisances lumineuses

De la même façon, les aides accordées par les acteurs publics tels que l'ADEME, les syndicats d'énergie et les réserves parlementaires ou ministérielles, destinées à la rénovation de l'éclairage public des communes doivent pouvoir inciter, en matière d'investissement, à une prise de décision adaptée aux enjeux du 21^{ème} siècle. En effet, celles-ci sont incitatives et peuvent permettre d'accélérer considérablement le retour sur investissement. **Ces dispositifs devraient néanmoins orienter les communes vers l'objectif de ne plus voir croître la quantité globale de lumière émise et vers des diagnostics de sobriété énergétique et lumineuse.** Les actions à implémenter dans ce domaine s'avèrent en effet être moins coûteuses, rentables et diminuent directement et immédiatement les pressions sur l'environnement. **Les études technico-économiques devraient être accompagnées d'études écologiques dont les résultats viendraient alimenter la prise de décision en matière de choix de matériels. De même, l'évaluation environnementale devrait prendre en compte les nuisances lumineuses définies par la loi.**

5.3.4 Les CEE : un dispositif public peu incitateur pour l'éclairage public

Les certificats d'économie d'énergie sont faiblement incitatifs et ne contribuent que peu au retour sur investissement des projets de rénovation en éclairage public et de manière plus générale en éclairage extérieur.

De plus, la mesure des économies d'énergie réellement obtenues reste à faire.

De même que les CEE sont désormais appelés à concourir davantage à l'objectif de prévention de la précarité énergétique, **il serait de plus intéressant que ces CEE concourent aux objectifs dans la loi, et valorisent davantage les actions visant à la sobriété énergétique qui peuvent réduire la pollution et les nuisances lumineuses immédiates**, alors que les seules démarches d'efficacité énergétique n'aboutissent pas nécessairement sur le terrain à moins d'émissions lumineuses.

La promesse de durée de vie des matériels de 30 ans, purement théorique, devra de plus être vérifiée et corrigée au regard des réalités constatées sur le terrain ou alors il ne devrait pas être possible de recourir une deuxième fois aux CEE pendant cette période de 30 ans, pour le matériel défaillant.

CONCLUSION

Les enjeux qui entourent les évolutions et la rénovation de l'éclairage extérieur dépassent le seul enjeu énergétique.

De par leurs emplacements, intensités, durées d'éclairage, orientations et spectres lumineux, les points lumineux fragmentent les milieux impactent les comportements et la synchronisation biologique des différentes espèces exposées et ont des effets à grande distance des sources. Ces nuisances peuvent être le résultat d'une exposition directe à la lumière ou de la diffusion de celle-ci dans l'atmosphère, amplifiée par la couverture nuageuse ou la pollution de l'air et les particules en suspension.

Ainsi, les points lumineux, *a fortiori* leur multiplication, sont à l'origine de perturbations qui peuvent impacter profondément les différentes espèces et *in fine* le fonctionnement des écosystèmes, et les interactions entre nature et sociétés humaines.

Ces dernières années, l'augmentation ou les variations du coût de l'énergie ont conduit les politiques publiques à se pencher en grande partie sur la question de l'efficacité énergétique. L'innovation, les recherches et les actions menées par les acteurs privés visent majoritairement à accroître le rendement lumineux, l'efficacité énergétique du matériel, à piloter à distance, à adjoindre d'autres fonctions urbaines aux lampadaires, sans que la question de la sobriété énergétique et lumineuse ne soit réellement posée. Or, la sobriété énergétique, présentée comme un objectif structurant dans le projet de loi de transition énergétique, est un réel enjeu car elle « consiste à interroger nos besoins puis agir à travers les comportements individuels et l'organisation collective sur nos différents usages de l'énergie, pour privilégier les plus utiles, restreindre les plus extravagants et supprimer les plus nuisibles »⁽⁶²⁾. De plus, la prévention, la limitation et la suppression des nuisances lumineuses et stopper l'érosion de la biodiversité sont des objectifs déjà inscrits dans la loi.

Ainsi, la sobriété énergétique constitue le premier degré d'action qui, outre réduire les consommations d'énergie, permet de réduire la pollution et les nuisances lumineuses, à travers une optimisation de l'éclairage dans l'espace et dans le temps. Ces actions sont par ailleurs souvent peu coûteuses et permettent de réaliser de véritables économies d'énergie. Les coupures réalisées en cœur de nuit peuvent réduire nettement les factures d'électricité des communes. A travers les retours d'expériences de communes participantes au concours Villes et Villages Etoilés, les communes signataires de la charte ANPCEN et les données collectées, l'ANPCEN montre que les extinctions sur une partie de la nuit permettent de réduire les consommations d'électricités de 25 % à 75 %⁽⁶³⁾. Les calculs effectués par l'Agence Concepto, sur certains pro-

jets sur lesquels elle est intervenue en éclairage extérieur, montrent que les extinctions en cœur de nuit font ressortir des chiffres comparables. Ces chiffres soulignent l'intérêt de se pencher davantage, dans un premier temps, sur les enjeux de sobriété énergétique et lumineuse dans un objectif double de réduction des dépenses énergétiques et de moindre incidence écologique.

De plus, les recherches menées sur l'efficacité énergétique tendent à privilégier uniquement la performance énergétique du matériel, sans interroger les usages, les besoins ou les autres impacts. Ceci a notamment conduit au développement de candélabres équipés de lampes (lampes aux iodures métallique et LEDs blanches) dont les impacts négatifs sont potentiellement forts pour la biodiversité. En effet, ces lampes au spectre large avec un pic important d'émission dans les basses longueurs d'onde sont jugées plus perturbantes pour nombre d'espèces d'après les recherches scientifiques. Il existe également de fortes interrogations quant aux effets de ces LEDs sur la santé humaine.

Dans la continuité du rapport de l'ANSES datant 2010, qui mettait en avant les risques potentiels forts des LEDs sur la santé humaine, le troisième Plan National Santé Environnement (PNSE3) prévoit en 2015 l'actualisation de l'évaluation des risques liés aux LEDs tant d'un point de vue sanitaire qu'environnemental.

L'alternance jour-nuit rythme la vie sur Terre depuis 3,7 milliards d'années. L'importance de ce rythme nyctéméral doit interroger l'ensemble des parties prenantes sur la meilleure façon de mieux concilier les enjeux sociétaux et environnementaux de l'éclairage extérieur. Les connaissances des effets de la lumière sur le vivant existent, les solutions contractuelles et financières également. Il faut désormais que les projets s'inscrivent dans une démarche sociétale responsable à travers :

- l'adoption d'objectifs plus globaux fixés dans le cahier des charges par les communes
- des études écologiques des territoires afin d'identifier les espèces potentiellement impactées par les nuisances lumineuses et l'incidence des choix effectués sur l'érosion de la biodiversité ;
- un diagnostic sur le potentiel des territoires en matière de sobriété énergétique et lumineuse ;
- une prise en compte de la gestion de la lumière artificielle nocturne dans les espaces protégés et les continuités écologiques pour favoriser une trame nocturne.

Ces études et diagnostics devront servir les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvres dans l'élaboration des projets qui, une fois réalisés, devront alors faire l'objet de mesures de suivi afin de s'assurer que les décisions prises s'accordent avec les ambitions d'un éclairage extérieur qui se veut véritablement durable.

⁽⁶²⁾ Association négaWatt, 2011.

⁽⁶³⁾ ANPCEN, Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (2014). Arrêt du 1^{er} juillet 2013 d'extinction des façades, vitrines, bureaux : Gaspillages énergétiques-nuisances lumineuses : des progrès, mais la réglementation reste à appliquer, et à faire appliquer par l'Etat et par les communes I. 2^{ème} bilan ANPCEN. Communiqué et dossier de presse du 29/10/2014.

FIGURES

Figure 1 : La température de couleur (Charte de l'éclairage du syndicat départemental de l'énergie 35, 2013)	9
Figure 2 : Lumen et Lux (energie-environnement.ch)	10
Figure 3 : L'indice de rendu des couleurs par lampe (Schéma adapté de la Charte de l'éclairage public du syndicat départemental de l'énergie 35, 2013)	11
Figure 4 : Exemples d'efficacité lumineuse (Schéma provenant de la Charte de l'éclairage public du syndicat départemental de l'énergie 35, 2013)	11
Figure 5 : Les phases du cycle de vie d'un produit technologique (U.S. Department of Energy, 2012)	15
Figure 6 : L'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels (MEDDE, 2013)	19
Figure 7 : Lampes utilisées en éclairage extérieur exclues du marché par le règlement européen 245/2009 (ADEME, AFE et Syndicat de l'éclairage, 2010)	20
Figure 8 : Mélatonine et organisation circadienne chez les mammifères (Falcón et al., 2007)	24
Figure 9 : Localisation de la glande pinéale chez une lamproie (dans Tanzarella, 2005, modifié d'après Beaumont et Cassier, 1994)	25
Figure 10 : Vision photopique et scotopique chez l'être humain (© Sound and Vision, 2015)	25
Figure 11 : Spectre d'absorption de la molécule d'eau (Touly, 2013)	30
Figure 12 : Schéma du fonctionnement des écosystèmes fluviaux. (Perkin et al., 2011)	31
Figure 13 : Exemple de luminaire «full cut-off» (ANPCEN)	42
Figure 14 : Principes du Contrat de performance énergétique (Deloitte, 2012 dans Chong, 2012)	53
Figure 15 : Le modèle ESCO (IEPF, 2002, dans Quicheron, 2005)	56
Figure 16 : Les aides de l'ADEME en fonction des objectifs de réduction de consommation d'électricité (ADEME, 2011)	58
Figure 17 : Exemple de subventions accordées pour les travaux de rénovation par le Syndicat départemental d'énergie 35	63

TABLEAUX

Tableau 1 : Les espaces protégés français (Adapté de UICN, 2010)	8
Tableau 2 : Le spectre lumineux (MEB-ANPCEN, 2015)	9
Tableau 3 : Eclairage en fonction des lieux et de leur fonctionnalité (Adapté de www.energie-environnement.ch, LUX*, Schubert**, Gaston et al., 2013)	10
Tableau 4 : Caractéristiques générales des principales familles de lampes utilisées pour l'éclairage extérieur	12
Tableau 5 : Bandes spectrales « à éviter » par groupes d'espèces (Tableau réalisé grâce aux informations issues de la synthèse bibliographique MEB-ANPCEN)	39
Tableau 6 : Lampes pouvant être recommandées lorsque la présence d'un éclairage artificiel demeure nécessaire	43
Tableau 7 : Durées et montants des contrats inclus dans l'enquête «Bilan et évolutions de contrats de partenariat d'éclairage public en France» (Le Lannier et Tra Tran, 2012)	52
Tableau 8 : Les différences entre les marchés publics et les contrats de partenariat (© MEB-ANPCEN 2015)	52
Tableau 9 : Les contrats de partenariats : avantages et inconvénients pour les collectivités (© MEB-ANPCEN 2015)	55
Tableau 10 : Les contrats globaux de performance : avantages et inconvénients pour les collectivités (© MEB-ANPCEN 2015)	55
Tableau 11 : Intérêts et limites du tiers financement et du tiers investissement (éléments issus de Ortega et Reinmann, 2013)	57
Tableau 12 : Bilan des aides de l'ADEME pour les communes de moins de 2000 habitants (Adapté de ADEME Basse Normandie, 2013)	59
Tableau 13 : CEE qui auraient pu être potentiellement délivrés dans le cadre de la rénovation en Facteur 2 et en Facteur 3 et 4 des communes de moins de 2 000 habitants aidées par l'ADEME (© MEB-ANPCEN 2015)	61

GLOSSAIRE

Biodiversité : Désigne la diversité des êtres vivants. Cette diversité s'exprime et joue un rôle à tous les niveaux d'organisation de la vie : la diversité des espèces ; la diversité au sein d'une espèce, entre les individus qui la constituent à un instant donné, la diversité écologique, celle des associations d'espèces dans un milieu donné (Stratégie Nationale pour la biodiversité 2011-2010).

Chaîne trophique : Ensemble des relations qui s'établissent entre des organismes en fonction de la façon dont ceux-ci se nourrissent.

Dérive larvaire : Dispersion des larves d'invertébrés vivant dans les cours d'eau. Elles sont portées par le courant des lieux où elles éclosent, vers des sites où elles peuvent se développer.

Dichromate : Se dit des espèces dont les photorécepteurs présents dans la rétine sont sensibles à deux types de longueurs d'onde.

Écosystème : Selon la Convention sur la Diversité Biologique, un écosystème est un « complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de microorganismes et de leur environnement non vivant qui par leur interactions, forment une unité fonctionnelle ».

Efficacité énergétique : Pour l'association NégaWatt, l'efficacité énergétique consiste à agir sur « les choix techniques en remontant de l'utilisation jusqu'à la production, sur la quantité d'énergie nécessaire pour satisfaire un service énergétique donné » et se différencie de la sobriété énergétique. Pour le CESE : l'efficacité énergétique se définit comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu.

Lucifuge : Les espèces qui fuient la lumière sont des espèces dites lucifuges.

Luminance : Grandeur mesurable correspondant à la sensation visuelle de luminosité d'une surface.

Mélatonine : La mélatonine est une hormone ubiquiste. Chez les vertébrés, elle joue le rôle de donneur de temps.

Phototaxie : Réaction spontanée, génétiquement programmée, d'un organisme vivant face à une source lumineuse. Celle-ci peut être positive (attraction) ou négative (rejet).

Pollution lumineuse : Rayonnement lumineux infrarouge, UV et visible émis à l'extérieur ou vers l'extérieur, et qui par sa direction, intensité ou qualité, peut avoir un effet nuisible ou inconfortant sur l'homme, sur le paysage ou les écosystèmes.

Rythmes biologiques : Variation périodique ou cyclique d'une fonction particulière d'un être vivant. Ce rythme peut être d'ordre physiologique (battement cardiaque, activité électrique cérébrale), biochimique (synthèse moléculaire, hormonale), comportementale (sommeil, migration, prédation).

Relation inter-spécifique : Toute relation qui s'établit entre des individus appartenant à des espèces différentes.

Relation intra-spécifique : Toute relation qui s'établit entre des individus appartenant à une seule et même espèce.

Scotophase : Période d'obscurité d'un cycle jour/nuit

Smolt : Stade de développement d'un salmonidé juvénile au cours de sa pré-adaptation physiologique et physique à la vie en milieu marin.

Sobriété énergétique : Selon l'association NégaWatt, la sobriété énergétique « consiste à interroger nos besoins puis agir à travers les comportements individuels et l'organisation collective sur nos différents usages de l'énergie, pour privilégier les plus utiles, restreindre les plus extravagants et supprimer les plus nuisibles » et se différencie de l'efficacité énergétique.

Tétrachromate : Se dit des espèces dont les photorécepteurs présents dans la rétine sont sensibles à quatre types de longueurs d'onde.

Trichromate : Se dit des espèces dont les photorécepteurs présents dans la rétine sont sensibles à trois types de longueurs d'onde.

Vision photopique : Désigne la vision diurne.

Vision scotopique : Désigne la vision nocturne.

RÉFÉRENCES

- ACRDP, Aquaculture Collaborative Research and Development Program (2012). *The effect of Photoperiod on Growth and Maturation of Atlantic Salmon (Salmo salar) in the Bay of Fundy*. Aquaculture Science Branch. Fisheries and Oceans Canada. Ottawa: Ontario
- ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (2013). *Energie et patrimoine communal: Enquête 2012*. Synthèse de l'étude.
- ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (2014). Bilan d'une opération de soutien aux petites communes issue de la Table Ronde Nationale sur l'Efficacité Energétique. *Rénovation de l'éclairage public*
- ADEME, Association française de l'éclairage et Syndicat de l'éclairage (2010). *Eclairer juste : Brochure sur l'éclairage public*.
- ALLAG-DHUISME F., AMSALLEM J., BARTHOD C. et al. (2010). *Choix stratégiques de nature à contribuer à la préservation et à la remise en bon état des continuités écologiques - premier document en appui à la mise en œuvre de la Trame verte et bleue en France*. Proposition issue du comité opérationnel Trame verte et bleue. Editions MEEDDM.
- ANPCN, Association nationale pour la protection du ciel nocturne (ND). *Recommandations pour un éclairage Assurant, sécurité, confort visuel, économies et protection de l'environnement*.
- ANPCN, Association nationale pour la protection du ciel nocturne (2007). *La pollution lumineuse*. Dossier. http://www.anpcen.fr/docs/20130810134255_diqrsp_doc89.pdf
- ANPCEN, Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (2013). *Alerte sur les LEDs ou diodes électroluminescentes*. Dossier de presse du 18/09/2013. http://www.anpcen.fr/?id_rub=11&id_ss_rub=197&id_actudetail=53
- ANPCEN, Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (2014). *Arrêté du 1er juillet 2013 d'extinction des façades, vitrines, bureaux : Gaspillages énergétiques-nuisances lumineuses : des progrès, mais la réglementation reste à appliquer, et à faire appliquer par l'Etat et par les communes !*. 2ème bilan ANPCEN. Communiqué et dossier de presse du 29/10/2014. http://www.anpcen.fr/?id_rub=1&id_ss_rub=127&id_actudetail=67 http://www.anpcen.fr/?id_rub=1&id_ss_rub=127&id_actudetail=82
- ANSES, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Octobre 2010). *Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED)*. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Edition scientifique.
- ASCEN, Association pour la Sauvegarde du Ciel et de l'Environnement Nocturnes (ND). *Recommandations pour une meilleure utilisation de l'éclairage public*. www.ascen.be
- Association négaWatt (2011). *Rapport technique : scénario négaWatt 2011*. Partie 1.
- Azan, W. (11 mars 2011). *Il faut développer le recours aux marchés publics pour la passation des contrats de performance énergétique*. Le Moniteur n°5598.
- Banque de France (2013). *Les partenariats publics privés - PPP*. Fiche n°419.
- Baker B. J. (2006). *The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, Rana clamitans malanota*. Department of Biological Sciences. University St. Catharines. Canada. Vol. 36
- Barbur J. L., Sotckman A. (2010). Photopic, Mesopic and Scotopic Vision and Changes in Visual Performance. In *Encyclopedia of the Eye* (Dartt D. A. eds.). Vol. 3. Oxford : Academic Press.
- Bardonnat A., Bolliet V., Belon V. (2004). *Recruitment abundance estimation: Role of glass eel (Anguilla Anguilla L.) response to light*. Vol. 321.
- Baur B. et al. (2004). *La biodiversité en Suisse*. Etat, sauvegarde, perspectives. Haupt Verlag.
- Bayarri M.J., Madrid J.A., Sanchez-Vasquez F.J. (2002). *Influence of light intensity, spectrum and orientation on sea bass plasma and ocular melatonin*. Journal of Pineal Research. Vol. 32.
- Bécamel C. (ND). *Origine et différents types de rythmes biologiques. Présentation ppt UE : Physiologie intégrée et Homeostasie*. Institut de Génomique Fonctionnelle. Université Montpellier 1.
- Binder T. R., Cooke S. J., Hinch S. G. (2011). *The Biology of Fish Migration*. Physiological specialization of fish groups.
- Blaxter J. H. S. (1975). Fish vision and applied research. *Vision in Fishes: new approaches in research* (M. A. Ali ed.). Plenum Press, New-York.
- Briggs W.R. (2002). *Plant photoreceptors: proteins that perceive information vital for plant development from the lighting in Ecological consequences of Artificial Night Lightning*. Conference abstracts. Los Angeles 23-24/02/2002
- Briggs W. R. (2006). *Physiologie of Plant Responses to Artificial lighting*. pp 389-411. *Ecological consequences of artificial night lighting* (C. RICH and T. LONGCORE, eds.). Island Press : Washington D.C..
- Brüning A., Hölker F., Franke S. et al. (2014). *Spotlight on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress*. Science of the Total Environment. Vol. 511.
- Buchanan B. W. (1993). *Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs*. Animal Behaviour. Vol. 45.
- Buchanan B. W. (1994). *Sexual dimorphism in Hyla squirella: chromatic and pattern variation between the sexes*. Copeia 1994.
- Buchanan B.W. (1998). *Low illumination prey detection by squirrel treefrogs*. Journal of Hepetology 32.
- Buchanan B. W. (2006). *Influence of artificial illumination on the nocturnal behavior and physiology of salamanders*. p. 221-251. Ecological consequences of artificial night lighting (C. RICH and T. LONGCORE, eds.). Island Press : Washington D.C.
- Buchanan B. W., Shardlow M. (2011). *A review of the impact of artificial light on invertebrates*. Buglife: The invertebrate conservation trust.
- Caroll A. L. (1994). *Interactions between body size and mating history influence the reproductive success of males of a tortricid moth, Zeiraphera canadensis*. Canadian Journal of Zoology.
- Caisse des Dépôts et de Consignation (Mai 2010). *Utiliser le « Tiers Investissement » pour la rénovation thermique du patrimoine bâti français*. Résumé pour décideurs. www.caissedesdepots.fr
- CGDD – DATAR, Commissariat Général au Développement Durable - Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale (2009). *Les espaces artificialisés en 2006 par département*. Conservation et gestion des ressources naturelles. 5 p.
- Challéat S. (2009). La pollution lumineuse : passer de la définition d'un problème à sa prise en compte technique. *Eclairer la ville autrement - Innovations et expérimentations en éclairage public*. Presses Polytechniques Universitaires Romandes.
- Chong E., Le Lannier A., Staropoli C. (2012). Les conditions d'efficacité des contrats de performance énergétique en France. Chaire Economie des Partenariats Public Privé. IAE de Paris.
- Clanche F., Rascol O. (2011). *Le découpage en unités urbaines de 2010*. INSEE Première. N°1364.
- Claustrat B. (2009). Mélatonine et troubles du rythme veille-sommeil. Médecine du sommeil. N°6, p. 12-14

- Contor, C. R., and J. S. Griffith. (1995). *Nocturnal emergence of juvenile rainbow trout from winter concealment relative to light intensity*. *Hydrobiologia*. Vol. 299.
- Commission Européenne (Juin 2011). Communication de la commission au parlement européen, au conseil et au comité économique et social européen. *Une vision stratégique pour les normes européennes : aller de l'avant pour améliorer et accélérer la croissance durable de l'économie européenne à l'horizon 2020* (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). COM/2011/0311
- Cour des Comptes (Février 2013). *Les concessions de distribution d'électricité : une organisation à simplifier, des investissements à financer*. Rapport public annuel 2013.
- Cour des Comptes (Octobre 2013). *Les certificats d'économie d'énergie*.
- Cour des Comptes (Février 2015). Les partenariats public-privé des collectivités territoriales : des risques à maîtriser. *Rapport public annuel 2015*.
- Cutchill I. C., Partridge J. C., Bennett A. T. D. et al. (2000). *Ultraviolet vision in birds*. Advances in the study of behavior (SLATER P. J. B.). Vol. 29.
- Czajka C. (Mars 2011). *Evaluer les coûts et optimiser la qualité de l'éclairage public*. Pratique : 10 conseils. Le Courrier des maires et des élus locaux. Mensuel, Mars 2011.
- Dale A. T., Bilec M. M., Marriott J., Hartley D. et al. (2011). *Preliminary Comparative Life-Cycle Impacts of Streetlight Technology*. *Journal of Infrastructure System*. Vol. 17, N°4.
- Dauchy R. T., Sauer L. A., Blask D. E. et al. (1997). *Light contamination during the dark phase in "photoperiodically controlled" animal rooms: effect on tumor growth and metabolism in rats*. *Laboratory Animal Science*. Vol. 47.
- Davies T. W., Bennie J., Gaston K. J. (2012). *Street lighting changes the composition of invertebrate communities*. *The Royal Society. Biology Letters*.
- Dominioni D.M., Goymann W., Helm B. et al. (2013). *Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (*Turdus merula*): implications of city life for biological time-keeping of songbirds*. *Frontiers in Biology*. Vol. 10. N°60.
- Durif C. (2003). La migration d'avalaison de l'anguille européenne. *Anguilla Anguilla: Caractérisation des fractions dévalentes, phénomène de migration et franchissement d'obstacles*. Thèse : Cemagref – Université Paul Sabatier Toulouse III.
- Dwyer R. G., Bearhop S., Campbell H. A. et al. (2012). *Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird*. *Journal of Animal Ecology*. Vol. 82.
- EDF (Juin 2010). *Eclairage public et LEDs: L'avis des experts*. Commun'idée. N°12.
- Eisenbeis G. (2006). *Artificial night lighting and insects: attraction of insects to street lamps in rural setting in Germany*. pp. 281-304. In *Ecological consequences of artificial night lighting* (C. RICH and T. LONGCORE, eds.). Island Press: Washington D.C.
- Eisenbeis G., and EICK K. (2011). *Studie zur Anziehung achtaktiver Insekten an die Straßenbeleuchtung unter Einbeziehung von LEDs*. *Natur und Landschaft*. 7.
- EMMY (Décembre, 2014). *Registre national des certificats d'économie d'énergie*. <https://www.emmy.fr>
- EPEC – European PPP expertise center (ND). *Energy Efficient Street Lighting*. 5 p.
- Etholia (2014). *Les certificats d'économie d'énergie*.
- Falcón J., Besseau L., Sauzet S. et al. (2007). *Mélatonine et régulations neuroendocrines chez le poisson*. *Journal de la Société de Biologie*. Vol. 1, N°1.
- Falcón J. (2011). *Mélatonine, the time keeper: biosynthesis and effects in fish*. *Cybiium*. Vol. 35, N°1
- Falkenberg J.C., Clarke J.A. (1998). *Microhabitat use of deer mice: effects of interspecific interaction risks*. *Journal of Mammalogy*. Vol. 79, N° 2.
- Febbraro I. et Zufferey A. (2005). *Analyse spatiale des obstacles à la colonisation de la plaine du Rhône par des espèces-cibles*. Master's Thesis, EPFL.
- Feder M. E., Burggren W. W. (1992). *Environmental physiology of the amphibians*. *The University of Chicago Press*. Ltd. London.
- Frank B. D. (2006). *Effects of Artificial Night Lighting on Moths*. pp 305-344. In *Ecological consequences of artificial night lighting* (C. RICH and T. LONGCORE, eds.). Island Press: Washington D.C.
- Froy O. (2011). *Circadian rhythms, Aging, and life span in Mammals*. *Physiology*. Vol. 26.
- Hoar W. S. (1951). *The behavior of chum, pink and coho salmon in relation to their seaward migration*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. Vol. 8.
- Kelber J.S., Warrant E., Sweeney A.M., Widder E.A. et al. (2006). *Crepuscular and nocturnal illumination and its effects on colour perception by the nocturnal hawkmoth *Deilephila elpenor**. *The Journal of experimental Biology*. Vol 209.
- Gaston K. J., Bennie J., Davies T. W. et al. (2013). *The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal*. *Biological Reviews*. Vol. 88.
- Gigleux M. & De Billy V. (2013). *Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques Cas de la faune piscicole*. CETE de l'Est et ONEMA.
- Gliwicz Z. M. (1986). *A lunar cycle in zooplankton*. *Journal of Comparative Physiology A. Ecology*. Vol. 67.
- Granier H. (2012). *Comment prendre en compte la pollution lumineuse dans l'identification des continuités écologiques?* Application au territoire du Parc Naturel Régional des Causses du Quercy. PNR des Causses du Quercy - Université Paris Diderot/Paris 7.
- Grimaud H. (2009). *Les lampes usagées : des DEEE pas comme les autres. Les lampes aussi ont leur filière de recyclage*.
- Gutierrez P., Delgado M. J., ANLONSO-BEDATE M. (1984). *Influence of photoperiod and melatonin administration on growth and metamorphosis in *Discoglossus pictus* larvae*. *Comparative Biochemistry and Physiology* 79A.
- Hale J. D., Fairbrass A. J., Matthews T. J. et al. (2014). *The ecological impact of city lighting scenarios: exploring gap crossing thresholds for urban bats*. *Global Change Biology*.
- Hanson K. C., Arrosa S., Hasler C. T. et al. (2008). *Effects of lunar cycles on the activity patterns and depth use of a temperate sport fish, the largemouth bass, *Micropterus salmoides**. *Fisheries Management and Ecology*. Vol. 15.
- Hobson E. S. (1965). *Diurnal-nocturnal activity of some inshore fishes in the Gulf of California*. *Copeia* 1965.
- Hölker F., Wolter C., Perkin E. et al. (2010). *Light pollution as a biodiversity threat*. *Journal ISSN*. Vol. 25. N°12.
- Hollan J. (2008). *What is light pollution, and how do we quantify it?* N. Copernicus Observatory and Planetarium : Brno.
- IESNA, Illuminating Engineering Society of North America (ND). *Fundamentals of lighting – ADDENDA #1 BUG RATINGS – Backlight, Uplight, and Glare*.
- IFREMER, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (1994). *Le saumon atlantique*. Editions de l'IFREMER.
- INSERM, Institut national de la santé et la recherche médicale (ND). *Rythmes biologiques, synchronisation et désynchronisation*.
- Ichikawa T., Hidecki T. (1982). *Distribution of colour receptors in the larval eyes of four species of Lepidoptera*. *Journal of Comparative Physiology A*. Vol. 149
- Iyengar V. K., Eisner T. (1999). *Heritability of body mass, a sexually selected trait, in an arctiid moth (*Utetheisa ornatrix*)*. *Proceedings of the National Academy Sciences*. USA. Vol. 96
- Jung C. M., Khalsa S. B. S., Scheer F. A. J. L. et al. (2010). *Acute Effects of Bright Light Exposure on Cortisol Levels*. *Journal of Biological Rhythms*. Vol. 25. N°3.

- Kokanee J. (February 2005). *Strobe light deterrent efficacy test and fish behavior determination at Grand Coulee Dam*. Third power plant forebay.
- Lacoeuilhe A., Machon N., Julien J-F, Le Bocq A. et al. (2014). *The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context*. PLoS ONE. Vol. 9, N°10.
- Lafitte B. (2014). *Quartiers et villes durables : L'éclairage public, dynamique et « éco-responsable »*. Présentation effectuée à l'occasion des Journées Nationales de la Lumière de l'AFE (22 et 23 septembre 2014).
- Larinier M., Boyer-Bernard S. (1991). *Downstream migration of smolts and effectiveness of a fish bypass structure at halsou hydroelectric powerhouse on the nive river*. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture. Vol. 21.
- Lazareva O. F., Shimizu T., Wasserman E. A. (2012). *How Animals See the World: Comparative Behavior, Biology, and Evolution of Vision*. OUP USA.
- LEC Lyon (2014). *Diodies superwatt : Données photométriques 2015*.
- Léger D., La Giclais (ND). *Horloge biologique et rythme veille/sommeil*. Faculté de Médecine de Paris Descartes. Centre du sommeil et de la vigilance. Hôtel Dieu APHP.
- Leinekugel Le Cocq T. (2013). *Le prix de l'électricité*. Panorama énergie-climat.
- LeTallec, Théry, and Perret, "Effects of Light Pollution on Seasonal Estrus and Daily Rhythms in a Nocturnal Primate."
- Le Lannier A., Tra Tran P. (2012). *Bilan et évolution des contrats de partenariat d'éclairage public en France*. Chaire Economie des Partenariats Public-Privé. IAE de Paris.
- Longcore T. and Rich C. (2004). *Ecological light pollution*. Front. Ecol. Environ. Vol. 2.
- Losey G. S., Cronin T. W., Goldsmith T. H., Hyde D., MARSHALL, McFarland W. N. (2005). *The UV visual world of fishes*. *Journal of Fish Biology*. Vol. 54.
- Louiset E. (2009). *Perturbation du rythme social circadien du cortisol*. Dossier Thématique. Edimark Santé.
- Lloyd J. E. (2006). *Stray Light, Fireflies, and Fireflyers*. p. 345-364. In *Ecological consequences of artificial night lighting* (Rich C. and Longcore T., eds.). Island Press: Washington D.C.
- LUX (2004). *Les normes européennes de l'éclairage : Eclairage public, lieux de travail, stades*. Lux : la revue de l'éclairage. N°228.
- MacGregor C. J. M., Pocock M. J. O., Fox R. et al. (2014). *Pollination by nocturnal Lepidoptera, and he effects of light pollution: a review*. *Ecological Entomology*. Vol. 10.
- Map of Life (28 November, 2014). *Trichromatic vision in mammals*. Department of Earth Sciences, University of Cambridge.
- MAPPP (2011). *Tableau comparatif des différents types de PPP*.
- MAPPP (2012). *Modalités de mise en œuvre du cofinancement public d'un CP*.
- Marchesan M. et al. (2004). *Behavioural effects of artificial light on fish species of commercial interest*. *Fisheries Research*. N°73.
- Max M., Menacker M. (1992). *Regulation of melatonin production by light, darkness, and temperature in the trout pineal*. *J. Comp. Physiol. A*, 170.
- Minarchy N. (2004). *Mortalité des Pétrels induite par les éclairages publics*. Document à l'usage des aménageurs éclairagistes et des décideurs. DESS Science et Gestion de l'Environnement Tropical. Université de la Réunion. Laboratoire ECOMAR – SEOR.
- MEDDE, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (4 avril 2013). *Réglementation en matière d'éclairage public*. 14ème législature. Journal Officiel du Sénat.
- MEDDE, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (4 avril 2013). *Quelles sont les règles de la commande publique à respecter par les collectivités territoriales qui souhaitent recourir au dispositif des certificats d'économies d'énergie*
- MEDDE, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (Août 2014). *Lettre d'information « Certificats d'économie d'énergie »*.
- Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (2010). *Stratégie Nationale pour la Biodiversité 2011-2020*.
- MOORE, M. V. et KOHLER, S. J. (2002). *Measuring light pollution in urban lakes and its effects on lake invertebrates*. Part of the conference Ecological Consequences of Artificial Night Lighting.
- Moore M. V., Pierce S. M., Walsh M. H. et al. (2000). *Urban light pollutions alters the diel vertical migration of Daphnia*. *Verh. Internat. Verein. Limnol. Stuggart*. Vol. 27.
- Mustapha M. K., Okafor B. U., Olaoti K. S. et al. (2012). *Effects of three different photoperiods on the growth and body coloration of juvenile African catfish, Clarias gariepinus (Burchell)*. *Arch. Pol. Fish*. Vol. 20.
- Najjar R. P., Chiquet C., Teikari P. et al. (2014). *Aging of non-visual spectral sensitivity to light humans: compensatory mechanisms?* *Plos Ones*. Vol. 9.
- Navarro-Barranco, C. et Hughes L.E. (2015). *Effects of Light Pollution on the Emergent Fauna of Shallow Marine Ecosystems: Amphipods as a Case Study*. *Marine Pollution Bulletin*. Accessed March 31, 2015.
- Nemeth R. S. et Anderson J. J. (1992). *Response of juvenile coho and chinook salmon to strobe and mercury vapor lights*. *North American Journal of Fisheries Management*. Vol. 12, N°4.
- Nightingale B., Longcore T., Simenstad C. A. (2006). *Artificial night lighting and fishes*. In *Ecological consequences of artificial night lighting* (Rich C. and Longcore T., eds.). Island Press: Washington D.C.
- NIGMS, National Institute of General Medical Sciences (2014). *Circadian Rhythms Fact Sheet*.
- ONB, Observatoire National de la Biodiversité (2014). *Artificialisation du territoire métropolitain*. Fichier xls.
- Ortega O. (2011). *Les contrats de performance énergétique*. Rapport à Madame Nathalie Kosciusko-Morizet, Ministre de l'écologie, du développement durable, du transport et du logement. Lefèvre Pelletier & associés.
- Ortega O. (13 Octobre 2014). *Projet de loi "transition énergétique": enfin un cadre juridique pour le tiers-financement*. *Droit de la construction*.
- OSRAM (2014). *Products' brochure*.
- Philips (2014). *Products' brochure*.
- Megdal S. P., Kroenke C. H., Laden F. et al. (2005). *Night work and breast cancer risk: a systematic review and meta-analysis*. *European Journal of Cancer*. Vol. 41.
- Muntz W. R. A. (1966). *Visual pigments and spectral sensitivity in Rana temporaria and other European tadpoles*. *Vision Research*. Vol. 6, N°11-12.
- Perkin K. E., Hölker F, Richardson J. S. et al. (2011). *The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives*. *Ecosphere*. Vol. 2, N° 11.
- Perkin K. E., Hölker F., Tockner K. (2013a). *The effect of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects*. *Freshwater Biology*. John Wiley & sons Ltd.
- Perkin K. E., Hölker F., Tockner K. et al. (2013b). *The short-term effects of artificial light on different trophic levels in small streams*.
- Perry G., Buchanan B. W., Fisher R. N. et al. (2008). *Effects of artificial lighting on amphibians and reptiles in urban environments*. In *"Urban Herpetology"* J.C. Mitchell, R.E. Jung Brown, and B. Bartholomew, editors *Herpetological Conservation*.

- Perry G., Fisher R. (2006). Night Lights and Reptiles: Observed and Potential Effects. In "Ecological consequences of artificial night lighting". p. 169-191. In *Ecological consequences of artificial night lighting* (Rich C. and Longcore T., eds.). Island Press : Washington D.C.
- Pintat P., Denis-Vernet M. (Mars, 2013). Contrat de partenariat, CREM, REM Conditions et intérêt en matière d'éclairage public. *Quel(s) contrat(s) pour l'éclairage public ? Contrats Publics*. N°130.
- Quiceron M. (2006). *Le rôle du tiers investisseur pour les investissements en efficacité énergétique dans les bâtiments du secteur tertiaire*. Diplôme d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement. Institut de gestion de l'environnement de d'aménagement du territoire. Université Libre de Bruxelles.
- Quimper Cornouaille Développement (2014). *Définition CPER*. Agence de développement économique et d'urbanisme.
- Lambert A., Boulard J-C (2013). *Rapport de la mission de lutte contre l'inflation normative*. Ministère de la réforme de l'état de la décentralisation et de la fonction publique, Ministère délégué chargé de la décentralisation.
- Reinmann I., Ortgega O. (2013). Le tiers-financement, une innovation pour financer l'efficacité énergétique. Immobilier durable. N°66. 4ème trimestre 2013.
- Reiter R. J., Tan D.X., Korkmaz A. et al. (2007). Light at night, chronodisruption, melatonin suppression, and cancer risk: a review. *Critical Reviews in Oncogenesis*. Vol. 13.
- Ribelayga C., Wang Y., Mangel S. C. (2004). *A circadian clock in the fish retina regulates dopamine release via activation of melatonin receptors*. *J. Physiol.* Vol. 554. N°2.
- Ricci N. (2014). *Le contrat de performance énergétique*. *Energie et collectivités*. Vol. 10.
- Rich C., Longcore T. (2006). *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press: Washington D.C..
- Roots C. (2006). *Nocturnal animals*. Greenwood Press : Westport.
- Rouveyran T., Fontaine C. (Avril 2011). *L'achat d'électricité par les collectivités publiques*. Contrats publics. N°109.
- Salamolard M., Couzi F.X., Pellerin M., Ghestemme T. (2001). *Etude complémentaire concernant la protection du Puffin de Baillon dans le cadre de la route des Tamarins*. Rapport SEOR/DDERéunion.
- Salmon M. (2006). *Protecting Sea Turtles from Artificial Night Lighting at Florida's Oceanic Beaches*. In *Ecological consequences of artificial night lighting*. p. 141-148. (C. RICH and T. LONGCORE, eds.). Island Press: Washington D.C.
- Scheuerell M. D., Schindler D. E. (2003). *Diel vertical migration by juvenile sockeye salmon: empirical evidence for the antipredation window*. *Ecology*. Vol. 84.
- SCETAUROUTE Nord et Est (2001). *Etude bibliographique sur les incidences de l'éclairage nocturne artificiel*. GREET Ing.
- Schubert E. F. (ND). *Human eye sensitivity and photometric quantities. The research group of E. Fred Schubert*. Rensselaer Polytechnic Institute. Chapter 16.
- Schubert E. F. (2006). *Light-Emitting Diodes*. Second Edition. Cambridge University Press.
- Shirai Y. (1993). *Factors influencing flight ability of male-adults of the diamondback moth, Plutella xylostella, with special reference to temperature conditions during the larval stage*. *Appl. Entomol. Zool.* 28.
- Shirai Y. (1995). *Longevity, flight ability and reproductive performance of the diamondback moth, Plutella xylostella (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae), related to adult body size*. *Res. Popul. Ecol.* 37.
- Siblet J-P. (Août 2008). *Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité*. Synthèse bibliographique. Rapport MNHN-SPN/MEEDDAT n°8.
- Somer-Yeates R., Hogson D., McGregor P. et al. (2013). *Shedding light on moths: shorter wavelengths attract noctuids more than geometrids*. *Biology letters*. Vol. 9.
- Stevens, R. G. (2009). *Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence*. *International Journal of Epidemiology*. Vol. 38.
- Syndicat de l'énergie 35 (2013). La charte de l'éclairage public.
- Tabor R. A., Brown G., Hird A. et al. (2001). *The effect of light intensity on predation of sockeye salmon fry by cottids in the Cedar River*. U.S. Fish and Wildlife Service. Western Washington Office, Fisheries and Watershed Assessment Division, Lacey. Washington.
- L. Tähkämö, M. Bazzana, P. Ravel, F. Grannec, C. Martinsons and G. Zissis, "Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire - a case study," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, no. 5, pp. 1009-1018, 2013
- Tammaru T., Ruohomaki K., Saikonen K. (1996). Components of male fitness in relation to body size in *Epirrita autumnata* (Lepidoptera, Geometridae). *Ecological Entomology*. Vol. 21.
- Tanzarella S. (2005). *Perception et communication chez les animaux*. De Boeck.
- Tarling G. A., Buchholz F. and Matthews J.B. L. (1999). *The effect of a lunar eclipse on the vertical migration behavior of Meganyctiphanes norvegica (Crustacea: Euphausiacea) in the Ligurian Sea*. *Journal of Plankton Research*. Vol. 21. N°8.
- Touly J-D. (2013). *Couleur bleue de l'eau pure. L'univers dans quelques gouttes d'eau!* Je comprends Enfin !.
- U.S. Department of Energy (2012). *Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED lighting products. Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps*. Building Technologies Program.
- Van Geffen K. G. and al (2014). *Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in moth*. *Ecology and Evolution*. John Wiley & Sons Ltd.
- Wise S. E., Buchanan B. W. (2006). Influence of artificial illumination on the nocturnal behavior and physiology of salamanders. p. 221-251. In *Ecological consequences of artificial night lighting* (Rich C. and Longcore T., eds.). Island Press: Washington D.C.
- Zamarenno C. (2011). *Le Contrat de Performance Energétique : un nouveau type de contrat performant pour les collectivités ?*. Université lumière Lyon 2. IEP de Lyon.

Depuis la fin du 19^{ème} siècle, le développement des territoires s'est accompagné de déploiement d'éclairages extérieurs, souvent perçus comme vecteur de sécurité et d'activités nocturnes. Premier projet d'investissements déclarés, auxquels s'ajoutent les coûts de consommation et maintenance, l'éclairage fait l'objet de budgets lourds pour les communes et leurs habitants. S'il rend des services, il réduit également de plus en plus la durée et les qualités de l'obscurité naturelle par ses usages actuels.

La distinction naturelle entre le jour et la nuit s'en trouve fortement impactée. La pollution lumineuse qui se développe avec la croissance de la lumière nocturne, s'accompagne d'effets perturbateurs souvent méconnus et sous-estimés sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes que les dernières évolutions technologiques dans le domaine de l'efficacité énergétique (comme les lampes aux iodures métalliques et les LEDs) tendent à aggraver.

Cette étude a pour premier objectif d'informer collectivités, Etat et organismes associés, professionnels de l'éclairage sur cet enjeu à travers une synthèse de publications scientifiques internationales, selon une typologie par grands groupes d'espèces fauniques, les enjeux floristiques méritant de faire l'objet d'une étude dédiée. Les travaux scientifiques montrent que la lumière artificielle nocturne est à l'origine de perturbations biologiques et comportementales pouvant altérer, voire bouleverser, le fonctionnement naturel des écosystèmes. La lumière artificielle nocturne est donc une pression sur la biodiversité qui, seule ou en combinaison avec d'autres pressions, contribue à l'érosion actuelle de la biodiversité et à la fragmentation des milieux.

L'étude apporte des recommandations techniques et/ou de « bon sens » ayant pour objet la sobriété énergétique et lumineuse afin de réduire les impacts sur la biodiversité. Il peut s'agir de réduire les durées et les niveaux d'éclairage, les puissances électriques et lumineuses, de supprimer des points lumineux et d'optimiser l'espace entre ces derniers, d'utiliser des lampes aux émissions spectrales relativement étroites (comme les lampes à sodium basse pression et dans une moindre mesure les lampes à sodium haute pression). Ce n'est pas une mais des solutions qui doivent émerger de réflexions, de discussions et d'études écologiques et énergétiques menées au niveau local par les collectivités, à ajuster aux espaces et espèces à considérer. Cette démarche s'inscrit dans un cadre législatif qui se renforce depuis la loi Grenelle 1, qui a fait de la prévention et la suppression des nuisances lumineuses pour la faune, la flore et les écosystèmes un objectif public.

La rénovation de l'éclairage extérieur des communes est ainsi appelée à progresser vers la conciliation d'enjeux sociétaux et environnementaux. Les extinctions en milieu de nuit sont peu coûteuses et à effets immédiats sur l'environnement. Le remplacement de luminaires, les nouvelles technologies et équipements, exigent des investissements lourds, effectués pour plusieurs décennies, dont les retours peuvent être longs. La dernière partie de l'étude est ainsi consacrée aux mécanismes contractuels et les aides mobilisables pour la rénovation de l'éclairage extérieur. L'analyse fait ressortir le potentiel intéressant des marchés globaux (marchés globaux de performance et contrats de partenariat) dans le cadre d'une démarche de rénovation ayant pour but de réduire intelligemment à la fois les consommations d'énergie et les impacts sur la biodiversité, ainsi que le potentiel innovant d'un tiers investissement adapté. D'autres sources d'aides financières existantes sont également analysées en rappelant la nécessité de mieux y intégrer les enjeux pluriels de réduction de la pollution lumineuse.



**MISSION ÉCONOMIE
DE LA BIODIVERSITÉ**

CDC BIODIVERSITÉ

102 RUE RÉAUMUR
75002 PARIS

TÉL. +33 (0)1 76 21 75 00
www.mission-economie-biodiversite.com

**ASSOCIATION NATIONALE
POUR LA PROTECTION DU CIEL
ET DE L'ENVIRONNEMENT
NOCTURNES**

3 RUE BEETHOVEN
75016 PARIS

www.anpcen.fr