



Administration
de la nature et des forêts



POLLUTION LUMINEUSE

préserver l'environnement
nocturne pour la biodiversité



FD



Sommaire

	Préface	4
	Objet du document	5
	Introduction générale sur la thématique de la pollution lumineuse	6
Problématique	Cas concrets	
	Les oiseaux	9
	Les insectes	10
	Les amphibiens	11
	Les chauves-souris	12
	Les autres mammifères	13
	Les poissons	14
	Mini-synthèse des conséquences sur les différents groupes	15
	Aspects d'écologie	17
	Introduction générale sur les recommandations	20
Synthèse Solutions	Recommandation 1	
	N'éclairer que ce qui est nécessaire	22
	Recommandation 2	
	N'éclairer que quand c'est nécessaire	23
	Recommandation 3	
	Structure des dispositifs d'éclairage	24
	Recommandation 4	
	Qualité de la lumière (spectre)	26
	Recommandation 5	
	Intensité des éclairages	27
	Recommandation 6	
	Sensibilisation et communication	28
	Pollution lumineuse, une réelle menace	30
	Pollution lumineuse, des corridors écologiques rompus	32
	Glossaire	36
	Bibliographie	37

Préface



Depuis l'apparition de la vie sur Terre, la lumière fait partie intégrante de l'évolution. Il s'agit d'un paramètre essentiel qui a structuré et défini la vie du vivant au fil du temps. Nous pouvons distinguer les espèces dites « diurnes » qui sont surtout actives la journée, des espèces « nocturnes » plus dynamiques durant la nuit.

Ceci est le fruit de millions d'années d'évolution et d'adaptations, permettant à chaque organisme d'être en adéquation avec son milieu de vie.

L'alternance du jour et de la nuit a permis à chaque espèce de développer des traits morphologiques, biologiques et comportementaux qui les caractérisent. Les vers luisants produisent de la lumière, les chouettes ont de grands yeux qui captent le peu de lumière qui reste pendant la nuit et plusieurs oiseaux migrateurs utilisent le ciel étoilé pour se repérer.

Bien que la durée de la nuit soit en moyenne plus courte que la phase de jour, on estime que près d'un quart des vertébrés et deux tiers des invertébrés seraient actifs durant la période sombre. Il faut bien remarquer que la majorité des animaux sur la planète sont nocturnes !

L'homme, se détachant des autres espèces, est quant à lui un être diurne. Afin de prolonger sa période d'activité, il a choisi de s'éclairer de manière artificielle et la lumière est rapidement devenue un symbole signe de progrès. L'éclairage artificiel n'a alors pas cessé de prendre de l'importance dans les sociétés modernes et cela dans de nombreux domaines (loisir, travail, sécurité, etc.). L'illumination nocturne s'est ainsi considérablement déployée à l'échelle mondiale au cours de ces dernières décennies.

Toutefois, conjointement à cette émission de lumière synonyme de progrès, les premières études scientifiques pointent à présent que cet éclairage artificiel peut avoir des effets et conséquences négatives notamment sur le rythme circadien. Mal maîtrisée, la lumière est devenue

une nouvelle source de pollution pouvant affecter l'humain, mais aussi la biodiversité.

Au Luxembourg, l'éclairage nocturne est quasiment présent partout et fait partie de notre culture, mais les émissions lumineuses superflues et nocives sont bien trop présentes et nous percevons de plus en plus la « pollution lumineuse ».

Bien sûr, toute forme de lumière n'est pas mauvaise. La première étape pour lutter contre cette pollution consiste à reconsidérer la nécessité d'éclairer systématiquement notre environnement et de supprimer ainsi les sources de lumière « inutiles ». Ce n'est que la « bonne lumière » qui doit être utilisée, là où elle est nécessaire, avec raison et selon les besoins.

La prise de conscience sur ce sujet s'est accrue ces dernières années et il faut continuer les efforts pour que cette thématique soit encore mieux prise en compte. Il est de la responsabilité de chacun de donner l'exemple de la modération dans le traitement de la lumière et d'encourager les bonnes actions.

L'Administration de la nature et des forêts présente ce livret, car la pollution lumineuse affecte nos écosystèmes et nous concerne tous, sans exception. Vous trouverez ici des exemples concrets des impacts liés à la pollution lumineuse subis par notre biodiversité, mais également quelques recommandations pour mieux prendre en compte cette thématique et mettre en place « l'éclairage de demain ». Il faut répondre à nos besoins tout en veillant sur notre nature et notre bien-être.

Je vous invite donc à découvrir ce livret qui nous montre le côté obscur de la lumière avec ses conséquences sur la biodiversité et la santé humaine. Mais tout n'est pas noir et des solutions existent pour éviter et réduire ces perturbations, et il faut que nous y contribuions tous ensemble.

Une très bonne lecture à vous !

Carole Dieschbourg,
Ministre de l'Environnement, du Climat et du Développement durable

Objet du document

Ce livret a été réalisé pour le compte de l'Administration de la nature et des forêts en raison d'une montée de la prise de conscience de la problématique de la pollution lumineuse*¹ au Luxembourg. En effet, une étude réalisée en 2016 (Dr Lukas Schuler) indique que la pollution lumineuse est en augmentation au Luxembourg, et qu'elle progresse même dans les espaces naturels, hors des zones urbaines.

La prise de conscience réelle des effets néfastes de la pollution lumineuse sur la santé humaine et l'environnement est un phénomène assez récent. Les impacts sur les processus biologiques sont observés à toutes les échelles du vivant, du niveau physiologique aux écosystèmes, en passant par les individus et les communautés d'organismes vivants. La pollution lumineuse participe à la perte et à la fragmentation des habitats*, entraîne des déséquilibres dans les réseaux trophiques et peut même entraîner une réduction de l'efficacité des services écosystémiques* comme la pollinisation.

Un guide technique visant particulièrement le cadre humain commandé par le Ministère du Développement durable et des Infrastructures a été produit en 2018 : « *Leitfaden „Gutes Licht“ im Außenraum für das Großherzogtum Luxemburg* » traitait en particulier des impacts sur l'Homme. L'objet du présent document est de mettre en lumière les impacts de l'éclairage nocturne artificiel sur l'environnement, d'insister sur ses conséquences sur la biodiversité et d'encourager sa prise en compte dans les politiques d'aménagement du territoire.

Ce livret vise une meilleure prise en compte de la biodiversité dans la réflexion sur la pollution lumineuse

À terme, la prise en compte de cette thématique du point de vue de la biodiversité passera par des actions à des échelles multiples, aussi bien au niveau individuel qu'au niveau des communes et au niveau régional. Une stratégie à large échelle doit être envisagée afin d'assurer la bonne coordination des actions et la cohérence avec les autres thématiques associées à la question de l'éclairage nocturne.

L'objectif devrait être d'assurer une meilleure prise en compte des effets de la pollution lumineuse sur la biodiversité en lien avec les politiques d'aménagement du territoire.

Ce livret est composé de 3 grands volets :

- La problématique de la pollution lumineuse et ses impacts sur la biodiversité ;
- Les recommandations générales qui peuvent être mises en place ;
- Une synthèse des thématiques développées.

1. Un astérisque marque les termes qui sont définis dans le glossaire en fin de document. L'astérisque n'est repris qu'à la première mention du terme dans le document.

Introduction générale sur la thématique de la pollution lumineuse



Bref historique des éclairages nocturnes modernes

L'éclairage artificiel nocturne est un fait relativement récent à l'échelle de l'histoire. L'éclairage des grandes villes s'est développé autour du XVII^e siècle, avec des moyens comme l'éclairage à l'huile et au gaz. À la fin du XIX^e siècle, l'électricité fait son apparition comme moyen d'illumination de l'espace public, et marque un tournant dans les possibilités de modification du paysage nocturne. Jusqu'à cette période, les écosystèmes avaient été peu exposés à des sources d'éclairage artificiel.

Initialement, l'éclairage public répondait aux besoins humains de déplacements nocturnes et de sécurité. Avec la généralisation de l'électrification des espaces, une augmentation générale du confort nocturne a été obtenue pour finalement dépasser ces besoins initiaux de service urbain. Les éclairages sont alors devenus de nouvelles formes de communication, d'expression politique, sociale ou de spectacle (enseignes publicitaires, mise en lumière de monuments, d'infrastructures, voire d'éléments naturels).

Le développement des sociétés humaines s'est accompagné d'une augmentation de l'urbanisation avec comme corollaire une augmentation importante des éclairages extérieurs. Ce développement n'a pas été accompagné d'une prise en compte des externalités*



©NASA

associées aux éclairages nocturnes et on parle à l'heure actuelle de véritable pollution associée aux éclairages nocturnes artificiels.

Cette problématique de la pollution lumineuse et de ses impacts sur l'espèce humaine et la biodiversité fait l'objet d'une attention en constante augmentation. À l'échelle mondiale, cette problématique touche particulièrement les pays développés, comme le montre la photographie prise depuis l'espace reprise ici. On y voit également que ce phénomène est bien présent au Luxembourg.

Qu'entend-on par « pollution lumineuse » ?

La pollution lumineuse est définie comme « le changement des niveaux naturels de lumière dans les paysages nocturnes par des sources d'éclairage artificiel ».

Elle affecte de multiples aspects de l'environnement. Ainsi, les observateurs des étoiles et de la voûte céleste déplorent la dégradation croissante de la qualité du ciel nocturne. Dans le cadre de ce document, nous nous concentrerons principalement sur la pollution lumineuse d'un point de vue écologique, c'est-à-dire les effets écologiques directs et indirects engendrés par les éclairages nocturnes artificiels.

La pollution lumineuse écologique peut être de différents types : éblouissement (par un contraste extrême entre des zones éclairées et sombres), l'encombrement lumineux (généralisé par un regroupement excessif d'éclairages), les lumières intrusives (pénétration de lumière dans des endroits normalement non éclairés), l'usage excessif de lumières (à des moments ou des endroits où elles ne sont pas utiles) et l'effet de halo (diffusion de la lumière interagissant avec des particules présentes dans l'atmosphère).

Cette pollution lumineuse est causée par les éclairages extérieurs, privés ou publics, pouvant être trop puissants, mal conçus, mal orientés et/ou utilisés de façon déraisonnable.

Comment mesure-t-on la lumière ?

Longueur d'onde¹

La lumière est une onde électromagnétique. Les ondes sont caractérisées par des cycles consécutifs dont la distance entre deux cycles consécutifs est mesurée par la longueur d'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, en fonction du processus physique utilisé pour générer une émission lumineuse, va émettre dans différentes longueurs d'onde. Ainsi, chaque lampe possède sa propre signature spectrale.

Le spectre lumineux¹ peut être divisé en trois catégories :

1. Rayonnement ultraviolet : < 400 nm
2. Rayonnement visible par l'Homme : 400 à 700 nm
3. Rayonnement infrarouge : > 700 nm

Le spectre lumineux (MEB-ANPCEN, 2015)	
	Longueur d'onde (nm)
UV	< 400
Violet	400 - 420
Bleu	420 - 500
Vert	500 - 575
Jaune	575 - 585
Orange	585 - 605
Rouge	605 - 700
IR	> 700

Température de couleur des lumières (Kelvin)

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 lumineuse considérée. Elle est mesurée en degrés Kelvin (K). Les lumières dont la température de couleur se trouve en dessous de 3 000 K peuvent être considérées comme des lumières chaudes par opposition aux lumières dites froides (> 3 000 K).

Puissance lumineuse (lumen)

La puissance lumineuse (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 (W) dans le cas général où l'on considère l'ensemble du spectre lumineux et en lumens (lm) si le récepteur de la lumière émise que l'on considère est l'œil humain en vision photopique (vision de jour).

Éclairage (lux)

L'éclairage correspond au flux lumineux reçu par mètre carré. Il est mesuré en lux (lx). Ainsi, le niveau d'éclairage d'une surface éclairée d'un mètre carré située à un mètre de la source lumineuse dont le flux lumineux est égal à 100 lumens est égal à 100 lux. Le tableau ci-contre reprend une série de valeurs d'éclairage en fonction des lieux et de leurs fonctionnalités.

Éclairage en fonction des lieux et de leur fonctionnalité (adapté de www.energie-environnement.ch, LUX¹, Schubert², Gaston *et al.*, 2013)

Lieux et fonctionnalités	Éclairage 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
Éclairage public dans les rues	10 lux ³
Passages piétons	50 lux
Salle de bains et WC	200 lux
Pièces à vivre	100 à 400 lux
Éclairage de bureau	100 à 1 000 lux
Éclairage dans un bloc opératoire	> 10 000 lux
Lumière du soleil	100 000 lux

1. LUX (2004). Les normes européennes de l'éclairage : Éclairage public, lieux de travail, stades. Lux : la revue de l'éclairage. N° 228.
2. SCHUBERT E. F. (ND). *Human eye sensibility and photometric quantities*. The research group of E. Fred Schubert. Rensselaer Polytechnic Institute. Chapter 16.
3. 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.





Cas concrets : les oiseaux

Des conséquences sur l'Homme

Les conséquences des éclairages artificiels nocturnes sur l'Homme et de la pollution lumineuse qui en découle sont de plus en plus étudiées. Les conséquences directes de la pollution lumineuse sont multiples à l'échelle de notre espèce et de nos sociétés.

La pollution lumineuse entraîne une perturbation de notre horloge biologique* interne associée aux cycles jour/nuit, avec des conséquences sur des processus biologiques comme les ondes cérébrales, la production hormonale ou la régulation cellulaire. Les conséquences les plus intuitives sont associées aux troubles du sommeil, comme les décalages des phases du sommeil ou les difficultés d'endormissement. Les perturbations de l'horloge biologique sont également associées à de nombreux désordres médicaux comme la dépression, les insomnies, les maladies cardiovasculaires et les cancers.

Du point de vue sociétal, cela représente une consommation d'énergie superflue de grande ampleur, avec des impacts financiers importants. Les conséquences physiologiques décrites ci-dessus sont également susceptibles d'entraîner des conséquences sociétales.

Du point de vue culturel, la pollution lumineuse entraîne une perte de la visibilité du ciel étoilé et de la Voie lactée. Certains auteurs estiment qu'un tiers de l'humanité ne voit à présent plus la Voie lactée.

Des conséquences sur la biodiversité

La plupart des espèces animales et végétales ont en fait développé des horloges biologiques contrôlées par les cycles jour/nuit. Comme pour l'Homme, ces horloges biologiques jouent un rôle clé dans le métabolisme, la croissance et le comportement.

Au cours de l'évolution, la succession naturelle du jour et de la nuit a entraîné des adaptations diverses aux conditions d'éclairement variable rencontrées au cours des périodes diurnes, nocturnes ou crépusculaires. Les éclairages nocturnes altèrent donc ce cycle naturel de la variation de la disponibilité de la lumière.

Une part très importante de la biodiversité est nocturne (environ 30 % des vertébrés et plus de 60 % des invertébrés). Les espèces adaptées aux conditions nocturnes connaissent donc une modification profonde de leur environnement dans les contextes éclairés au cours de la nuit. À noter que les espèces diurnes subissent également des perturbations en lien avec la pollution lumineuse.

Au Luxembourg, la thématique de la pollution lumineuse a principalement été considérée du point de vue des effets néfastes sur l'espèce humaine. Dans la suite de ce document, ses conséquences sur la faune et leurs effets en cascade seront traités.

La pollution lumineuse a des conséquences globales sur la faune et la flore, quelles que soient leurs adaptations aux conditions nocturnes

Les oiseaux, selon les espèces, peuvent présenter des mœurs plutôt diurnes ou nocturnes, et la pollution lumineuse est susceptible d'avoir des impacts sur ces deux groupes. Les thématiques les plus étudiées chez les oiseaux en lien avec la pollution lumineuse sont l'altération des périodes d'activité, l'augmentation de la mortalité et la désorientation des déplacements en migration*.

La vision est un sens très important pour les oiseaux pour s'orienter et chasser. La lumière artificielle peut affecter le rythme du sommeil et de recherche de nourriture.

Les espèces diurnes sont susceptibles de voir leur période d'activité potentielle augmentée par l'éclairage artificiel. En milieu perturbé par l'éclairage nocturne, des espèces comme le rouge-gorge et le merle sont régulièrement surprises à chanter la nuit, bien au-delà des périodes d'activité pour des individus de la même espèce dans des contextes non pollués. Des oiseaux prédateurs comme certains rapaces diurnes peuvent également voir leur période d'activité étendue. C'est notamment le cas du faucon pèlerin dont l'activité de chasse a déjà été relevée en période nocturne.

L'éblouissement des oiseaux actifs la nuit est un facteur aggravant dans les collisions avec les véhicules. Les collisions avec des véhicules sont d'ailleurs la première cause de mortalité chez la chouette effraie, un rapace

nocturne. Les abords des infrastructures sont attractifs pour cette espèce car ils sont généralement ouverts, riches en proies et présentent des perchoirs divers. La lumière rasante des phares peut provoquer un éblouissement et augmenter fortement le risque de collision. Ce risque accru de collision est également observable chez l'engoulevent d'Europe.

Une part importante de la migration se déroule au cours de la nuit. Le ciel étoilé et certains corps célestes participent à l'orientation des oiseaux migrateurs nocturnes au cours de leurs longs parcours. Les halos lumineux, en réduisant leur visibilité, peuvent donc impacter négativement les capacités d'orientation des migrateurs au long cours. Cette désorientation peut entraîner une dépense inutile d'énergie bien nécessaire pour les longs déplacements de migration. En cas de mauvaises conditions de visibilité, les éléments lumineux ponctuels (phares, pont, tour éclairée, etc.) peuvent également attirer les oiseaux et les dévier de leur route initiale ou entraîner une mortalité par collision parfois importante. Les halos lumineux et les éléments lumineux ponctuels peuvent même constituer de véritables pièges autour desquels des oiseaux tournoient jusqu'à entrer en collision avec un obstacle ou mourir d'épuisement ou par prédation.



Cas concrets : les insectes

L'influence des éclairages nocturnes sur les insectes est probablement celle qui paraît la plus évidente. Les insectes majoritairement attirés par ceux-ci sont des moustiques, des papillons, des mouches et des coléoptères. Cette attractivité peut se faire ressentir de 400 à 700 m au cours des nuits normales et à environ 50 m lors des nuits de pleine lune. Ces distances permettent d'imaginer l'effet de lampadaires espacés de 30 à 50 m... Les lumières blanches et riches en longueurs d'onde courtes sont particulièrement attractives pour bon nombre d'insectes.

Cette attraction se montre très problématique pour de nombreuses espèces, dont les individus subissent une augmentation du risque de mortalité très importante. En effet, les insectes tournoient autour de la source de lumière, parfois jusqu'à épuisement, grillés par la température élevée dégagée par les lampes, ou jusqu'à être la proie de prédateurs comme certains amphibiens, chauves-souris ou même des araignées tissant leur toile sous les lampadaires.

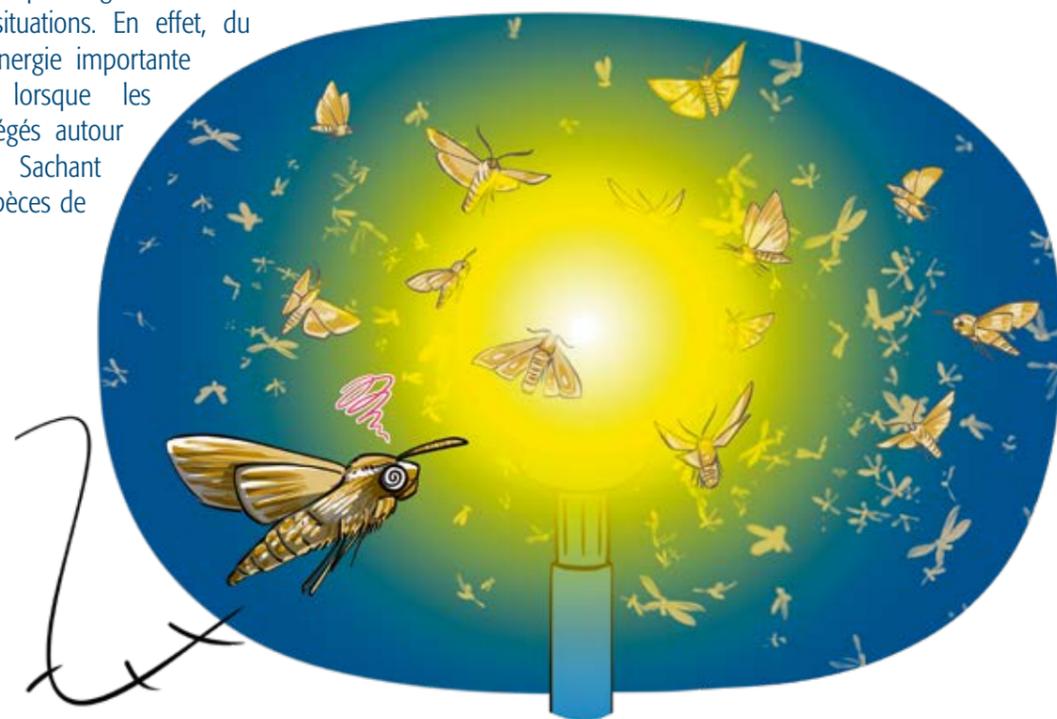
Des chercheurs allemands ont estimé à 150 le nombre d'insectes tués par lampadaire et par nuit d'été, ce qui représentait en 2000 plus d'un milliard d'insectes tués par nuit sur les 6,8 millions de réverbères en Allemagne.

La reproduction peut également être mise à mal dans certaines situations. En effet, du temps et une énergie importante sont gaspillés lorsque les insectes sont piégés autour d'un éclairage. Sachant que certaines espèces de

papillons de nuit ne disposent pas d'appareils buccaux leur permettant de se nourrir, le temps et les ressources emmagasinées au stade larvaire sont particulièrement précieux. En état de stress, les femelles ne déposeront plus leurs œufs aux endroits adéquats pour le développement et la survie des œufs et des larves.

Il existe également des cas de phototaxies* négatives. Certains auteurs ont identifié que l'éclairage nocturne sur des ponts traversant des rivières pouvait jouer un rôle de barrière optique pour les insectes se déplaçant le long des cours d'eau. Ceux-ci, rebroussant chemin et ne parvenant pas à franchir l'obstacle, dépensent inutilement leur énergie et peuvent même être amenés à déposer leurs œufs dans des endroits défavorables.

Un exemple emblématique d'espèces pour lesquelles l'éclairage nocturne s'avère nocif est celui des lucioles. En effet, l'émission de lumière est utilisée pour la communication sexuelle : les femelles sont ainsi capables d'attirer les mâles à plus de 45 m dans de bonnes conditions nocturnes. Dans les zones éclairées, cette distance est fortement réduite.



Cas concrets : les amphibiens

Les amphibiens sont des animaux essentiellement nocturnes, et les altérations comportementales dues à la pollution lumineuse mises en évidence sont nombreuses. Comme dans d'autres groupes d'animaux, la réponse d'attraction ou de répulsion varie en fonction des espèces considérées.

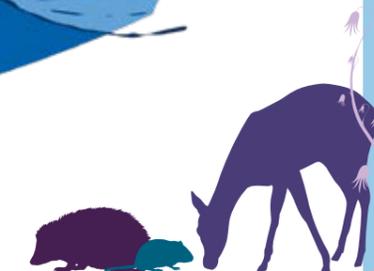
Certaines espèces sont attirées par la lumière, elles sont dites à phototaxie positive. Pour elles, une augmentation du risque de mortalité par prédation ou par collision est observée.

D'autres espèces, dont le crapaud commun, évitent les zones éclairées pour leurs déplacements nocturnes, elles sont dites à phototaxie négative. Ceci peut avoir des conséquences négatives directes en empêchant les individus de se déplacer entre leur zone d'hivernage et leur zone de reproduction. Certains auteurs indiquent

que la qualité de la lumière (d'un point de vue longueur d'onde) influence ce phénomène : les lumières riches en fréquences courtes augmentent l'effet d'évitement.

L'éclairage nocturne est également susceptible d'affecter la reproduction de ces espèces par différents mécanismes : baisse des vocalisations en période nuptiale, baisse de la sélectivité du partenaire, réduction des déplacements, etc. pouvant ultimement entraîner une baisse des accouplements ou des accouplements moins optimaux, et donc avoir un effet négatif sur la dynamique des populations locales.

Enfin, les éclairages brefs peuvent provoquer un éblouissement, entraînant une baisse des capacités visuelles et donc une efficacité moindre dans la recherche de nourriture et une augmentation du risque de prédation.





Cas concrets : les chauves-souris

Les chauves-souris, ou chiroptères, sont des animaux adaptés aux conditions nocturnes. Ils ne partent en quête de leur nourriture qu'une fois la nuit tombée. Des modifications de leur environnement lumineux sont donc susceptibles d'entraîner des impacts variés. Deux grands types de réactions sont observés : une tolérance, voire une attraction, et la répulsion.

Certaines espèces s'accommodent de la présence de lumière durant la nuit, et peuvent même tirer un avantage à chasser sous les lampadaires. En effet, ceux-ci peuvent être de véritables lieux de concentration des proies des chauves-souris. Les noctules, les sérotines et les pipistrelles (des espèces adaptées à la recherche de nourriture en milieu ouvert) sont celles qui tolèrent le mieux l'éclairage nocturne. Ces espèces semblent en tirer des bénéfices, mais ceci à faible échelle spatiale et temporelle. À plus long terme, et en fonction de l'environnement, la quantité de proies est susceptible de baisser, réduisant la qualité du terrain de chasse à l'échelle locale. L'augmentation du risque de prédation dans les secteurs éclairés est également un facteur très impactant pour les chauves-souris. En effet, ces espèces ont peu de jeunes chaque année, rendant les populations sensibles à la perte d'effectifs.

Les espèces lucifuges, comme les oreillards, les murins et les rhinolophes, subissent quant à elles des impacts négatifs en lien avec l'éclairage. Les zones éclairées au cours de la nuit ne sont plus fréquentées par ces espèces, représentant

autant de perte de territoire de chasse et de barrière aux mouvements des individus. Dans certaines situations, l'éclairage peut retarder le moment où les chauves-souris sortent de leur gîte pour aller chasser. Ceci aura alors pour conséquence d'écourter la période propice à l'acquisition de nourriture. De tels retards augmentent également le risque que les chauves-souris ratent le pic d'abondance des insectes observé au crépuscule, réduisant la qualité du temps de recherche de nourriture. Ceci peut alors avoir des conséquences au niveau individuel mais également à l'échelle de la colonie toute entière ! Les espèces les plus susceptibles de subir des impacts négatifs sont celles dont les gîtes de maternité sont localisés dans les villages et qui doivent rejoindre des zones naturelles plus ou moins éloignées pour aller chasser. Il est important de noter que les espèces patrimoniales sont plus impactées que les espèces communes.

Comme chez les oiseaux migrateurs, la pollution lumineuse est susceptible de désorienter certaines espèces de chauves-souris migratrices en perturbant par exemple les mécanismes de calibration de leur « boussole interne ».



Cas concrets : les autres mammifères



De nombreux mammifères sont actifs la nuit pour une part significative de leur temps d'activité journalier. Des modifications de l'activité en fonction de l'éclairage nocturne comme les variations des phases de la Lune peuvent influencer le comportement chez certaines espèces, avec des niveaux d'activité relevés moins importants lors des nuits de pleine lune, laissant entrevoir les conséquences de niveaux d'éclairage supérieurs.

Des études montrent que la part d'activité nocturne chez de nombreux mammifères est en augmentation dans les secteurs perturbés par les activités humaines.

Les mammifères prédateurs, en particulier les prédateurs opportunistes, sont susceptibles de voir leur régime alimentaire modifié dans les zones éclairées la nuit. Ceci en raison notamment de la modification des communautés d'arthropodes dans ces zones, en particulier les insectes comme nous avons pu le voir précédemment. Certains prédateurs adaptés aux déplacements nocturnes peuvent voir leurs déplacements perturbés par les éclairages nocturnes.

Les mammifères situés plus bas dans la chaîne alimentaire montrent également une tendance générale à éviter les zones éclairées la nuit, ce qui induit une perte potentielle d'habitat et peut même entraîner un effet de barrière. Dans d'autres circonstances, comme la présence de nourriture particulièrement attractive, certaines espèces prendront malgré tout le risque de se déplacer en territoire éclairé, comme le hamster d'Europe (ce qu'elles éviteraient autrement). Ceci a pour conséquence d'augmenter le risque de prédation.

Comme dans d'autres groupes précédemment cités, certains mammifères évitent les zones éclairées. Cela

peut entraîner une perte d'habitat voire créer un effet de barrière, et ainsi réduire la connectivité du paysage*. Ceci a également été montré dans le cas de passages à faune avec une baisse nette de l'usage due à des éclairages nocturnes, même s'ils n'éclairaient pas directement la structure, rendant ces passages inefficaces pour les espèces les moins tolérantes à l'éclairage nocturne.

L'éclairage nocturne peut également avoir des conséquences physiologiques importantes chez les mammifères. Les cycles éveil/sommeil peuvent être perturbés, engendrant des conséquences variées comme une baisse des capacités de réaction, pouvant mener *in fine* à une augmentation du risque de prédation. Les variations naturelles de la lumière au cours des saisons impliquent également des changements physiologiques chez les mammifères, comme des modifications des capacités de thermorégulation*. Il a été montré chez certaines espèces de micromammifères que des perturbations lumineuses pouvaient entraîner une mauvaise acclimatation aux conditions hivernales, entraînant une augmentation de la mortalité.

L'éclairage associé aux routes peut également avoir pour conséquence de piéger certains mammifères. En effet, les espèces perturbées sont plus susceptibles d'être victimes de collisions. L'éclairage soudain engendré par les phares des véhicules augmente très fortement le risque de collision puisqu'en réaction à l'éclairage intense, les animaux ont tendance à se figer, aveuglés et ne pouvant identifier le moyen d'éviter la collision. Ce phénomène peut être observé chez les hérissons et les chevreuils notamment.



Cas concrets : les poissons

Les effets des éclairages artificiels nocturnes sur les écosystèmes aquatiques sont moins étudiés que pour les écosystèmes terrestres. Il existe néanmoins de nombreuses études indiquant des effets tout aussi problématiques sur les organismes aquatiques, dont les poissons.

Comme pour les organismes terrestres, deux grandes catégories de réactions sont observées : attraction ou répulsion. Il a même été démontré que chez certaines espèces de poissons, dont la truite, la réaction est différente en fonction du stade de développement : les alevins* et les juvéniles sont totalement nocturnes et lucifuges alors que les adultes sont diurnes et que les individus âgés sont plutôt crépusculaires.

D'un point de vue physiologique, les éclairages nocturnes artificiels peuvent perturber la production d'hormones, en particulier celles associées au rythme

jour-nuit. Cela peut influencer sur le développement des individus et affecter les rythmes biologiques. Ces effets ont été observés chez certaines espèces à des niveaux d'intensité lumineuse aussi faibles qu'1 lux.

Autre effet délétère des éclairages nocturnes artificiels, la production d'hormones sexuelles associées au rythme des saisons peut être affectée, avec des conséquences potentielles sur la reproduction chez certaines espèces. À titre d'exemple, des éclairages en continu sont parfois utilisés en aquaculture commerciale afin d'empêcher la maturité sexuelle au profit de la croissance des individus.



Mini-synthèse des conséquences sur les différents groupes

Nous l'avons vu, la pollution lumineuse a des effets sur des groupes biologiques aux adaptations et aux mœurs très différentes, en milieu terrestre comme en milieu aquatique, aussi bien sur ceux qui vivent le jour que sur ceux qui vivent la nuit. Ceci n'est en rien étonnant puisque la majeure partie de l'histoire évolutive des espèces est basée sur des fluctuations naturelles des niveaux d'éclairage associées au cycle jour/nuit et à celui des saisons.

Dans les pages précédentes, seuls des exemples associés à la faune ont été présentés. Cependant, la flore subit elle aussi les effets néfastes des éclairages nocturnes, qui peuvent perturber des fonctions vitales comme la croissance, la chute des feuilles ou la floraison, et donc la reproduction.

La réponse des organismes est variable en fonction de la qualité de la lumière émise

La composition spectrale, avec ses différentes longueurs d'onde, conditionne la réaction des organismes à la lumière. Le tableau ci-dessous indique les longueurs d'onde auxquelles sont sensibles différents groupes animaux. On constate que les impacts sur la faune sont d'autant plus marqués que les longueurs d'onde sont courtes.

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
Longueur d'onde (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.
© MEB-ANPCEN 2015

Dérèglement de l'horloge biologique (jour/nuit)

Le dérèglement de l'horloge biologique peut entraîner, par l'altération du cycle naturel jour/nuit, une modification de l'activité journalière des animaux. Un éclairage laissé allumé toute la nuit modifiera le rythme du réveil/sommeil d'espèces diurnes, avec une phase d'activité rallongée et une perte de repos journalier. Cela aura pour conséquence une fatigue supplémentaire potentiellement fatale pour des individus placés en situation d'urgence. Dans le cas d'espèces nocturnes, c'est l'inverse qui se produit : la présence d'un éclairage diminue leur période d'activité et augmente leur phase de repos. Ainsi, il leur reste moins de temps disponible pour s'alimenter, pour se livrer aux parades sexuelles ou encore explorer le milieu environnant, avec le risque de voir leur survie compromise.

Dérèglement de l'horloge biologique (saison)

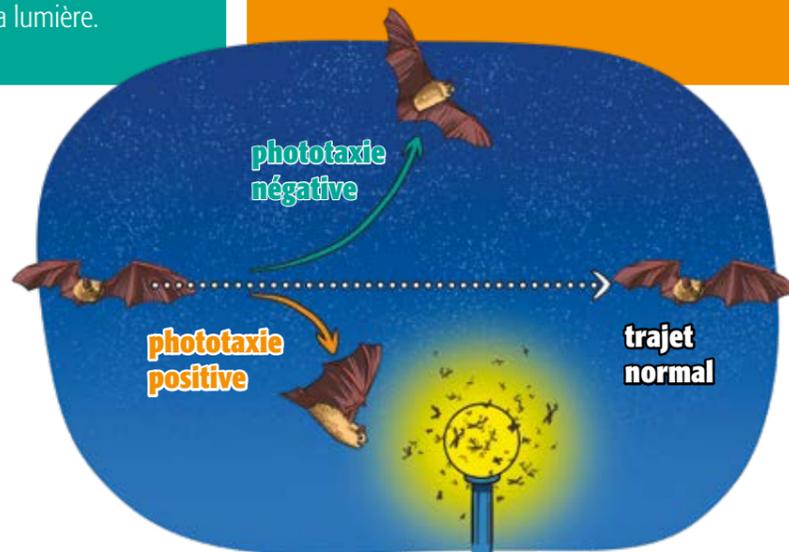
La présence d'un éclairage nocturne artificiel impacte la photopériode*, qui est le rapport entre la durée du jour et la durée de la nuit au sein d'une journée de 24 heures. Or, la photopériode est essentielle à de nombreux organismes car elle leur indique la saison à laquelle ils se trouvent et quels sont les comportements qu'ils doivent adopter. Ainsi la présence d'un éclairage peut initier de manière trop précoce des comportements adaptés au printemps ou laisser se poursuivre des comportements automnaux trop tard dans la saison. C'est ce que l'on appelle un décalage phénologique*, dont les conséquences sur la survie peuvent être graves. Par exemple si la reproduction d'une espèce se déroule trop tôt dans la saison, à une période où la nourriture n'est pas encore disponible ; ou si l'entrée en hibernation est plus tardive alors que plus aucune nourriture n'est disponible.

Phototaxie négative : perte d'habitat et barrière au déplacement

Un éclairage nocturne artificiel peut dresser une barrière face à toute une série d'animaux nocturnes qui fuient la lumière. L'illumination excessive par des lampadaires peut les effaroucher au point qu'ils évitent de traverser une route. Ce phénomène a pour conséquence une perte d'habitat du fait de zones éclairées devenues indisponibles et de potentielles zones d'alimentation ou de reproduction désormais inaccessibles, car situées au-delà de la barrière. La multiplication de ces obstacles lumineux a également un effet négatif sur la communication entre les différentes populations d'une espèce donnée suite à la fragmentation des habitats et du paysage. Ces divers mécanismes pourront aggraver le risque de disparition d'espèces sensibles à la lumière.

Phototaxie positive : perturbations des déplacements et mortalité

L'éclairage nocturne artificiel est capable de désorienter les animaux attirés par la lumière la nuit. Les lumières nocturnes peuvent agir comme de véritables pièges desquels les organismes ne sauront pas s'échapper. Dans cette situation, ceux-ci dépensent inutilement une énergie qu'ils n'investiront pas pour se reproduire ou rechercher leur nourriture. Le risque de mortalité peut augmenter très fortement par affaiblissement, facilitation de la prédation ou encore collision. Dans certaines situations, l'habitat des espèces peut être drainé de ses individus, le risque de disparition d'une population étant alors à redouter.



Aspects d'écologie

Dans les pages suivantes, nous nous détacherons de l'approche par groupe biologique pour adopter une approche plus englobante, intégrée, en d'autres mots, une vision plus « écologique » de la problématique de la pollution lumineuse.

L'objet de cette partie est d'illustrer par quelques thématiques choisies les conséquences en cascade entraînées par les éclairages nocturnes artificiels.

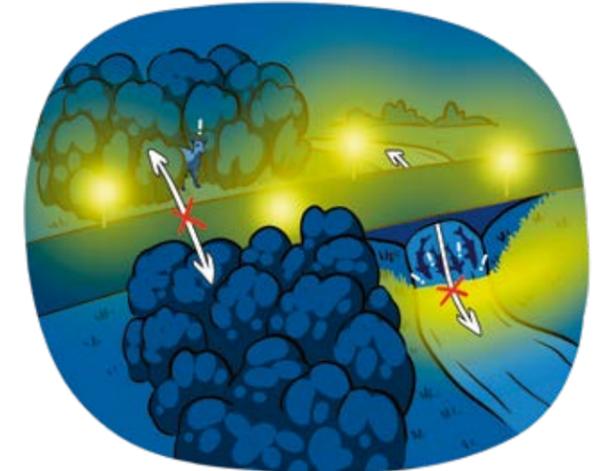
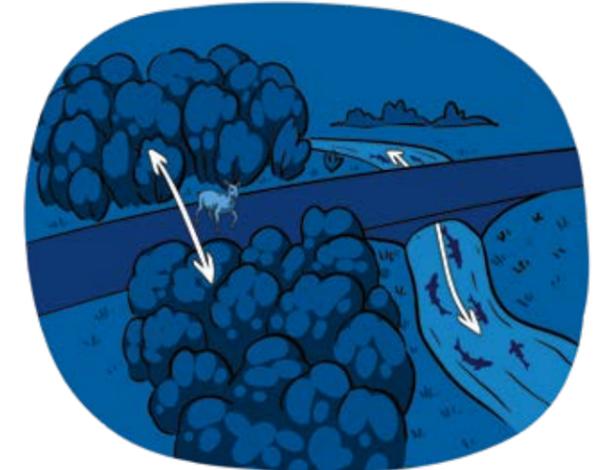
Des impacts de l'échelle individuelle à l'aire de distribution des espèces

Nous l'avons vu, les individus de nombreuses espèces subissent les conséquences de la pollution lumineuse. Au sein d'une espèce, ces conséquences au niveau individuel se traduisent par une multitude d'impacts en cascade, à des niveaux d'organisation supérieurs au sein de l'espèce : la population, la métapopulation* et l'aire de distribution.

La perte d'habitat et la fragmentation des habitats sont parmi les principales causes du déclin de la biodiversité, et la pollution lumineuse participe à ces processus.

À l'échelle locale, les perturbations comportementales ainsi que le temps et l'énergie gaspillés induits par les éclairages nocturnes influencent la dynamique de la population. La baisse de la reproduction, la diminution de la qualité de la descendance ou plus simplement l'augmentation des niveaux de mortalité peuvent mener à l'extinction locale.

À plus grande échelle, les mouvements d'individus entre zones d'habitat ou entre populations locales, particulièrement importants pour le maintien d'une espèce dans une région donnée, peuvent tout simplement être bloqués. En effet, à court terme, ces mouvements permettent aux individus de se reproduire et donc de perpétuer l'espèce, de trouver des zones plus riches ou diversifiées en nourriture, voire d'échapper à des conditions locales défavorables. À plus long terme, ces mouvements sont essentiels pour assurer les échanges génétiques entre populations, permettant de réduire les risques de consanguinité et d'extinction. Les populations isolées présentant un faible nombre d'individus sont en effet davantage menacées d'extinction, que ce soit



pour des raisons génétiques, démographiques ou environnementales.

De par ses influences sur la diversité génétique des espèces, certains auteurs considèrent que la pollution lumineuse est devenue une pression de sélection importante agissant sur la biodiversité. Des exemples de conséquences évolutives de la pollution lumineuse existent déjà, comme le fait que des papillons de nuit se déplaçaient moins loin et perdaient donc en mobilité.

Autant de phénomènes cumulés peuvent modifier la répartition d'une espèce à l'échelle nationale.

La perte d'habitat et leur fragmentation induite par les éclairages artificiels nocturnes peuvent être considérées à différentes échelles spatiales :

- Un point lumineux isolé, pouvant avoir une incidence sur une colonie de chauves-souris par exemple ;
- Un alignement de points lumineux, par exemple susceptible de constituer une barrière entre zones d'habitat favorable ;
- Le halo lumineux au-dessus des villes.

Des conséquences au niveau des communautés d'espèces et de leurs interactions

Les conséquences décrites ci-dessus, observées au niveau d'une espèce, peuvent elles-mêmes avoir des répercussions sur d'autres espèces par le biais des interactions qu'elles entretiennent.

À la lecture des cas que nous avons présentés, les perturbations de la chaîne alimentaire sont peut-être les premières à venir à l'esprit. Par exemple, les éclairages nocturnes sont susceptibles d'attirer une masse importante d'insectes dans leur parage, avec pour double conséquence de créer une surabondance de proies pour les prédateurs qui tolèrent bien les éclairages, et d'engendrer une raréfaction des proies pour les espèces qui les évitent.

Les interactions « proie-prédateur » ne sont pas les seules à pouvoir être impactées par la pollution lumineuse. En réalité, on peut s'attendre à ce que tous les types d'interactions impliquant une espèce sensible à la pollution lumineuse soient perturbés.

Prenons le cas de la pollinisation par les insectes, qui est l'interaction impliquant le transfert de pollens entre deux plants d'une même espèce. Il a été démontré que les perturbations engendrées par les éclairages nocturnes artificiels pouvaient entraîner une baisse de la fréquentation des plantes par les insectes, réduisant d'autant le transfert de pollen. Une étude a montré que malgré la fréquentation diurne par des pollinisateurs, la production de fruits en secteur éclairé durant la nuit était inférieure à celle des secteurs non éclairés.

Les perturbations en cascade sont susceptibles d'engendrer des déséquilibres écosystémiques

Des conséquences sur les services écosystémiques

La pollinisation est justement une de ces interactions naturelles entre organismes vivants dont nous tirons parti pour nos activités, en particulier en agriculture. L'expression « services écosystémiques » est utilisée dans ce cas de figure, c'est-à-dire lorsque les écosystèmes contribuent aux activités et au bien-être de l'humanité.

Un autre service écosystémique associé aux insectes et à l'agriculture est la régulation des espèces parasites des cultures par leurs prédateurs.

La réduction de l'efficacité de la pollinisation ou du contrôle des parasites est susceptible d'avoir des conséquences non négligeables sur le bien-être de l'humanité et sur les secteurs économiques qui bénéficient de ces services écosystémiques.

La pollution lumineuse peut entraîner une baisse dans la fourniture des services écosystémiques

Les conditions nocturnes offrent également ce que l'on appelle des services écosystémiques culturels, associés par exemple à l'observation de la Voie lactée et du reste du ciel étoilé. Les éclairages artificiels nocturnes, lorsqu'ils gênent l'observation des étoiles, entraînent une perte de valeur esthétique importante par rapport à l'histoire de l'humanité.

Enfin, au vu des conséquences potentielles sur le sommeil et la santé humaine en général, certains chercheurs encouragent même à considérer les conditions nocturnes comme un service écosystémique à part entière. Celui-ci permettant d'assurer l'organisation des activités humaines autour du cycle jour/nuit et de participer à la bonne santé des personnes.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de quantification du coût réel des conséquences de la réduction de fourniture de services écosystémiques en lien avec la pollution lumineuse.

Le grand rhinolophe, une chauve-souris sensible à la pollution lumineuse.

V. Ruffray/Biotopie



Introduction générale sur les recommandations



Les sources de pollution lumineuse sont nombreuses et proviennent aussi bien d'éclairages intérieurs qu'extérieurs, privés ou publics, lesquels peuvent être trop puissants, mal conçus, mal orientés et/ou utilisés de façon déraisonnable.

Ces éclairages nocturnes, nous l'avons vu, ont des effets importants sur la faune et la flore. La pollution lumineuse perturbe les individus et les populations, elle affecte même les interactions entre espèces et peut mener à une réduction de la fourniture de services écosystémiques.

Les solutions à cette nuisance peuvent sembler évidentes. Il faut lutter contre l'éclairage inutile, réduire sa puissance, utiliser les technologies les moins impactantes et surtout les adapter au contexte.

Malgré la prise de conscience que l'énergie doit être économisée, la disponibilité de sources lumineuses toujours plus efficaces et économes en énergie conduit, par effet rebond, à une utilisation encore plus importante de la lumière. Les luminaires à LED de très petites dimensions sont disponibles à faible coût, avec un éclairage accru des façades, des chemins et des jardins privés, sans utilité publique réelle, réduisant d'autant l'espace nocturne.

La lutte contre la pollution lumineuse consiste à optimiser les moyens techniques afin de réduire le gaspillage d'énergie et devrait intégrer la limitation des effets négatifs sur la faune et la flore en haute priorité. Cette maîtrise de l'énergie, couplée à une meilleure utilisation des procédés d'éclairage, produira inévitablement des économies, favorisera la biodiversité et augmentera la qualité du paysage nocturne en réhabilitant notamment l'observation des étoiles.

Pour lutter contre la pollution lumineuse, il faut lutter contre l'éclairage inutile, en priorité aux endroits les plus sensibles pour la biodiversité.

Les recommandations contre la pollution lumineuse qui impliquent une réduction des éclairages pourraient susciter des craintes auprès des élus et du grand public, comme celle d'une aggravation de l'insécurité. Pourtant, contrairement aux idées reçues, la limitation des éclairages nocturnes excessifs ne s'accompagne pas d'une augmentation des risques inhérents à la conduite

automobile nocturne ni à celle des actes de banditisme ou de cambriolage, ainsi que l'ont démontré diverses études et projets pilotes dans plusieurs pays européens.

La lutte contre la pollution lumineuse en faveur de la biodiversité n'implique pas de supprimer tous les éclairages, mais plutôt de les repenser.

La lutte contre la pollution lumineuse devrait mieux considérer la biodiversité pour adopter une approche intégrative de la problématique et des solutions à apporter.

Le renouvellement de l'éclairage public offre la possibilité de réduire la pollution lumineuse. Les éclairages actuels sont encore principalement constitués de lampes à haute pression, mais devraient progressivement être remplacés dans les années à venir par des technologies moins énergivores, comme la technologie LED. Le choix exact de la technologie à mettre en place devrait intégrer les éventuels effets néfastes sur la biodiversité, afin de limiter les perturbations sur les écosystèmes.

Actuellement, la thématique des éclairages nocturnes artificiels reste encore très centrée sur les effets humains, sociaux et économiques. La considération de la composante biodiversité est encore trop limitée au Luxembourg.

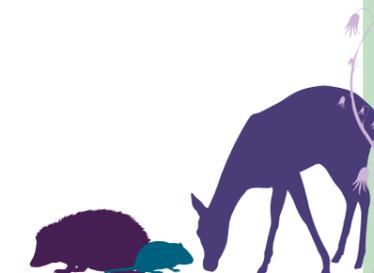
Des actions concluantes ont été mises en œuvre dans le Parc naturel de l'Our, essentiellement à l'échelle locale, la communication étant principalement axée sur les économies d'énergie et de budget, ainsi que sur la préservation du ciel étoilé et des zones Natura 2000.

Ces actions ont été menées dans plusieurs communes (Klimabündnis avec l'initiative DarkSky en 2010) et plus récemment dans le cadre du projet INTERREG Europe Night Light et sur base du guide *Leitfaden „Gutes Licht“ im Außenraum für das Großherzogtum Luxemburg* : parmi elles, un masterplan de minimisation de la pollution lumineuse dans la commune de Clervaux, l'optimisation de l'éclairage public et la redéfinition des heures de coupures de l'éclairage sur la commune de Putscheid ou encore la mise en place d'une réglementation concernant les enseignes publicitaires dans la commune d'Hosingen.

Pour être pleinement efficace pour l'environnement et la biodiversité sur le long terme, la problématique des éclairages nocturnes doit être considérée dans les politiques d'aménagement du territoire à une échelle supra locale, c'est-à-dire de manière coordonnée à l'échelle du territoire.

Des projets pilotes d'intégration de la biodiversité dans la réflexion sur la problématique de la pollution

lumineuse sont menés à échelle internationale (Dark sky communities, parks and reserves). En France, citons pour exemple le projet TRAME NOIRE porté par le bureau d'études Biotope, ou le projet Trame sombre porté par le Parc national des Pyrénées. Ces projets visent à intégrer la question des éclairages nocturnes dans la réflexion sur la mise en place et l'efficacité du réseau écologique*.



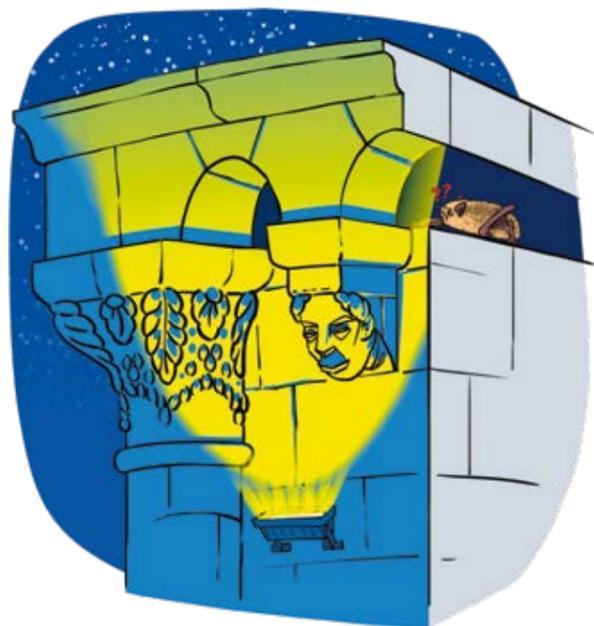
Recommandation 1 N'éclairer que ce qui est nécessaire

Un premier axe de réflexion important pour lutter contre la pollution lumineuse est celui de la nécessité réelle d'éclairer d'un élément du paysage.

La sobriété lumineuse, par la diminution de la quantité d'éclairage, est l'une des meilleures approches pour ne pas nuire à la biodiversité.

L'éclairage public et privé ne devrait être en marche que lorsqu'il est considéré comme nécessaire, restreint lorsque son utilisation est facultative, voire supprimé dans les cas où il se révèle inutile ou trop impactant. Le retrait des points lumineux non nécessaires est l'une des mesures les plus efficaces pour réduire les impacts sur la biodiversité.

Dans le cas d'une mise en valeur de bâtiments historiques ou d'ouvrages d'art, n'éclairer qu'une partie de l'élément à mettre en valeur (la façade principale par exemple) peut déjà réduire les impacts sur la biodiversité. Dans certaines circonstances particulières, notamment le cas de l'occupation avérée ou potentielle d'un bâtiment par une colonie de chauves-souris, exclure les éclairages des chemins d'accès serait également une mesure très favorable, qui laisserait à ces animaux plus de temps pour chasser leurs petites proies, et dans de meilleures conditions.



La nécessité des éclairages autour des zones à enjeux pour la biodiversité, qu'il s'agisse de zones naturelles ou semi-naturelles ou de constructions humaines, doit être particulièrement bien pesée.

Outre des effets positifs sur la faune et la flore, cette recommandation implique également des bénéfices en termes d'économie d'énergie et de bien-être pour l'Homme.

Finalement, il s'agit simplement d'interroger nos besoins afin de cibler uniquement ce qu'il est nécessaire d'éclairer.



Recommandation 2 N'éclairer que quand c'est nécessaire

Afin de lutter plus efficacement contre la pollution lumineuse, il s'agit de savoir à quels moments l'éclairage est vraiment nécessaire et exerce le moins d'impacts sur la biodiversité. Tout en respectant les normes actuellement en vigueur (notamment la norme EN 13201), il faut se demander à quoi sert d'éclairer des rues ou des bâtiments au beau milieu de la nuit quand il n'y a plus personne pour les admirer.

Dans la même logique que la recommandation précédente, l'éclairage ne devrait être activé qu'aux moments où il est strictement nécessaire.

Cette gestion de l'éclairage dans le temps doit être étudiée à l'échelle de la journée, avec une adaptation aux besoins réels d'usage. L'éclairement naturel variant d'une saison à l'autre, les périodes d'éclairage doivent être adaptées. Des horloges astronomiques aident à optimiser les heures de fonctionnement et d'extinction selon les heures réelles de coucher et de lever du soleil tout au long de l'année.

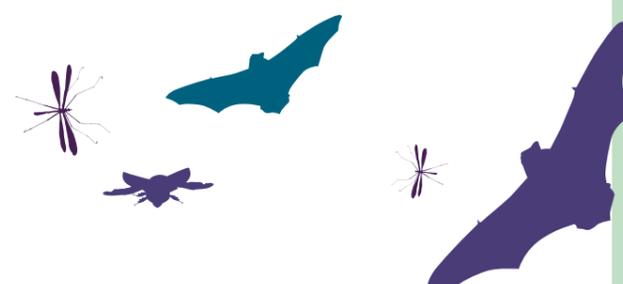
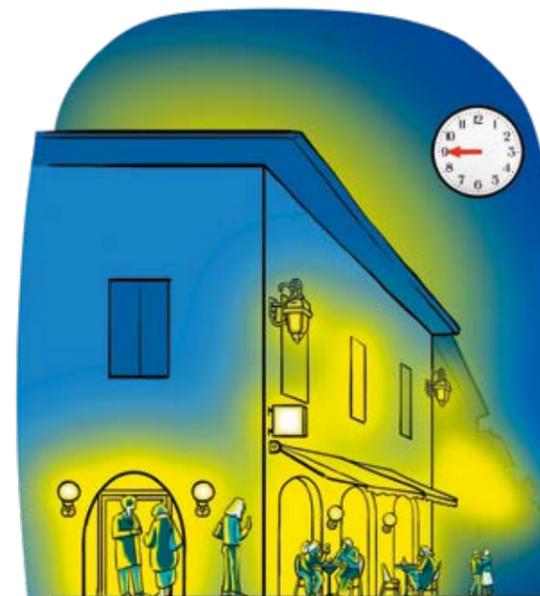
On peut élargir cette réflexion sur la gestion des éclairages selon les saisons en prenant en compte les sensibilités propres à chaque espèce au cours de l'année. En fonction des lieux et de la saison, celles qui se déplacent de façon saisonnière seront présentes ou au contraire absentes à un endroit donné, et pourraient se révéler plus ou moins sensibles à l'éclairage nocturne.

Par exemple, l'éclairage des ouvrages d'art est susceptible d'avoir des effets négatifs sur les oiseaux migrateurs qui peuvent être attirés et entrer en collision avec l'obstacle.

La mise en place de cette recommandation implique une bonne connaissance des horaires de fréquentation des lieux et des usages, ainsi que des enjeux de biodiversité associés aux sensibilités des espèces présentes, et ce afin de régler au mieux les plages de fonctionnement des éclairages. Des détecteurs de présence humaine peuvent activer un éclairage ponctuel, permettant d'assurer la sécurité de tous.

Dans ce cadre, maintenir l'éclairage en début de nuit et le diminuer progressivement peut être une solution, permettant ainsi d'adapter l'éclairage aux périodes de plus forte activité humaine nocturne.

Mais il faut garder à l'esprit que la période crépusculaire est un moment clé d'activité pour nombre d'espèces (insectes, chauves-souris, autres mammifères, etc.). De ce fait, l'application de cette recommandation reste inadaptée aux espèces actives en début de nuit, comme le sont de nombreuses chauves-souris.



Recommandation 3 Structure des dispositifs d'éclairage

Lorsque l'éclairage nocturne est indispensable, une réflexion sur la structure même des dispositifs d'éclairage s'impose. Le mobilier d'éclairage doit être conçu de sorte à minimiser les déperditions de lumière dans les espaces entourant l'élément à éclairer.

L'une des principales adaptations consiste à contrôler et diriger le flux de lumière vers la zone que l'on souhaite éclairer, en évitant toute déperdition lumineuse vers des zones qu'il est inutile d'éclairer comme le ciel et les espaces naturels adjacents. En effet, la focalisation de la lumière peut réduire l'impact de l'éclairage sur l'environnement. Certains modèles de luminaires permettent de limiter la pollution lumineuse, il s'agit de lampadaires orientés à l'horizontale **1**, à optique asymétrique permettant l'orientation du flux lumineux **2**, et dont les ampoules sont sous capot abat-jour (sans verre protecteur) ou sous verres plats et transparents **3**. Les lanternes à verre bombé et les boules sont quant à elles à proscrire car elles diffusent la lumière inutilement dans toutes les directions.

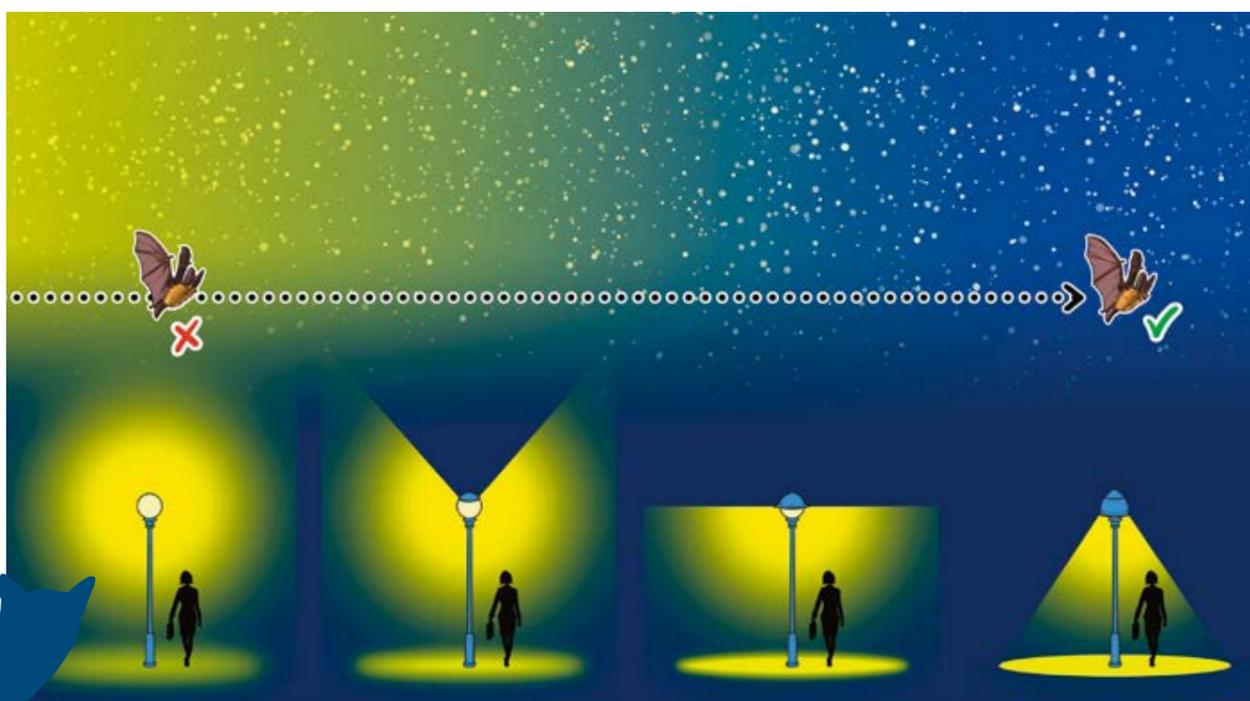
Une attention particulière doit être apportée à proximité des surfaces réfléchissantes artificielles ou naturelles

tels que les étangs et autres milieux aquatiques car ils augmentent fortement la diffusion de la lumière dans le milieu.

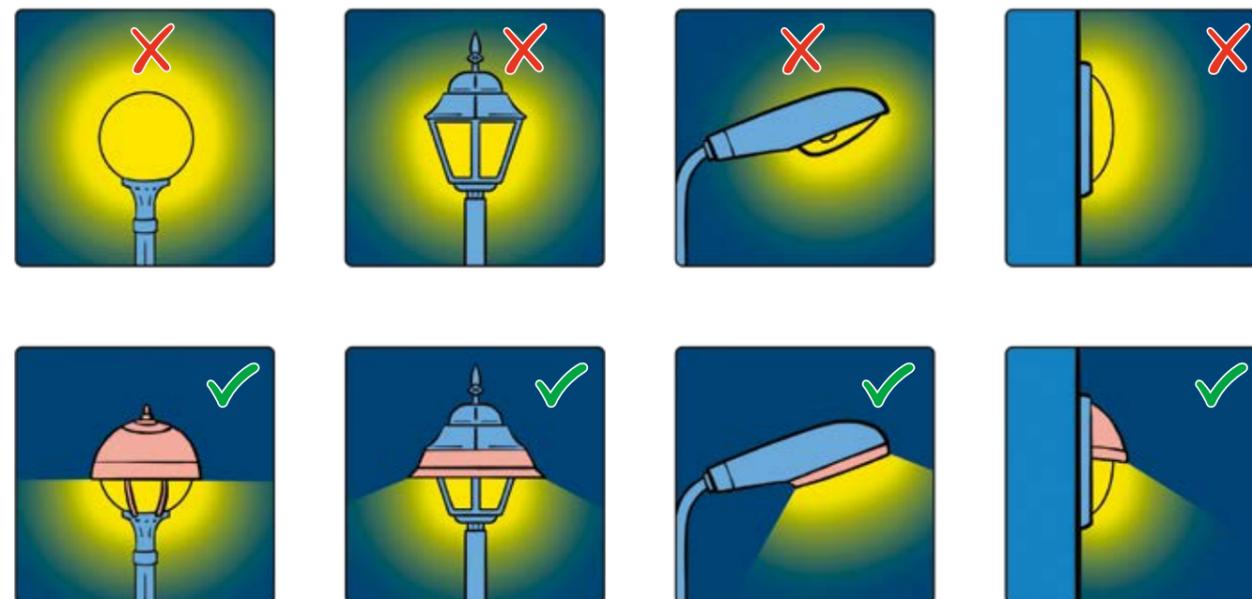
En matière d'efficacité des dispositifs d'éclairage dans la limitation de la pollution lumineuse, le concept d'ULOR*, pour *Upward light output ratio*, exprimé en pourcentage, est un indicateur intéressant. Il s'agit de la part de lumière émise par une source lumineuse au-dessus de l'horizontale. Plus le pourcentage est bas, moins la lumière est émise vers le ciel. Attention toutefois, l'ULOR n'est pas uniquement déterminé par le luminaire mais également par le choix de revêtement dont les capacités de réflexion peuvent varier selon le type.

Un point à prendre en considération est la hauteur de la source lumineuse. En effet, plus elle est proche du sol, plus l'espace inutilement éclairé et la puissance de la lampe peuvent être réduits. Autre point important, il faut mesurer l'écart entre les luminaires, afin d'optimiser la fraction de lumière utile. Ces deux points dépendent des besoins réels en lumière, de la zone à éclairer, du type de lampe et des propriétés optiques du réflecteur.

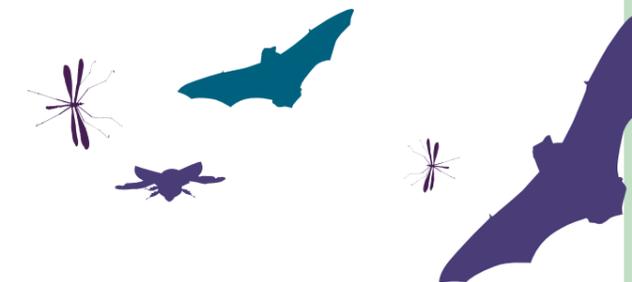
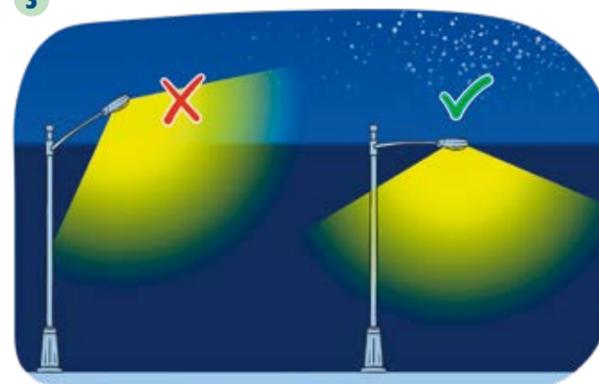
1



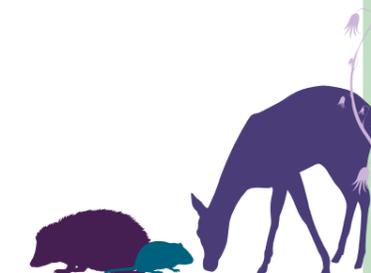
2



3



25



Recommandation 4

Qualité de la lumière (spectre)

Nous l'avons vu, tous les types de lumières n'ont pas le même impact sur l'environnement en fonction du spectre d'émission ou de la « chaleur de la lumière », mesurée en degrés Kelvin (K).

Le choix de la longueur d'onde est complexe car chaque groupe d'espèces montre des réactions différentes. Néanmoins, les lampes émettant dans les longueurs d'onde courtes (de l'ultraviolet au bleu-vert) et longues (de l'orange au rouge) semblent être les plus impactantes. Les LED bleues sont par ailleurs suspectées d'avoir des conséquences sur la santé humaine. Les longueurs d'onde les moins impactantes se situent dans le jaune.

Les LEDs blanches, particulièrement efficaces d'un point de vue énergétique, restent peu recommandées

car ce sont des lampes à large spectre émettant dans le bleu et les ultraviolets. Ces longueurs d'onde influencent particulièrement la réponse d'attraction et de répulsion, notamment chez les insectes.

Il apparaît globalement favorable pour la biodiversité d'utiliser des ampoules à spectre étroit, qui émettent plutôt dans l'ambre que dans le blanc. Ainsi, il est préférable de choisir des lampes LED ambrées à spectre étroit.

en première partie de nuit pour ensuite passer sur une lumière avec un spectre réduit et adapté à la présence des espèces dominantes sur le site.

Lampes pouvant être recommandées lorsque la présence d'un éclairage artificiel demeure nécessaire

Longueur d'onde (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			
Poissons d'eau douce	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 • LEDs Ambrées à spectre étroit • LEDs Rouges	• Fluo compacte (blanc le plus chaud < 2 700°K) • Tube fluorescent (blanc le plus chaud < 2 700°K)
Crustacés (zooplancton)	x	x*	x*							
Amphibiens et reptiles	x	x	x	**	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 < 2 700°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 < 2 700°K) • Tube fluorescent (blanc le plus chaud < 2 700°K)
Chiroptères	x	x	x	x					• Sodium Basse Pression • Sodium Haute Pression	• Fluo compacte (blanc le plus chaud < 2 700°K)
Insectes	x	x	x	x					• LEDs Ambrées à spectre étroit • LEDs Rouges	• Tube fluorescent (blanc le plus chaud < 2 700°K)

x* Probable mais non identifié dans la littérature scientifique.

** < à 500 et > à 550

© MEB-ANPCEN 2015

Recommandation 5

Intensité des éclairages

Le comportement de certaines espèces, comme les chauves-souris, peut être influencé par des variations des niveaux d'éclairage naturel subtiles associées aux phases lunaires.

Dans ce contexte, il apparaît évident que l'intensité des éclairages nocturnes artificiels, se situant à des niveaux d'éclairage bien supérieurs aux variations des niveaux d'éclairage naturel subtiles associées aux phases lunaires, influence la faune et la flore. Cependant, les seuils de tolérance sont variables en fonction des espèces, et pour bon nombre d'entre elles, nous manquons encore cruellement de connaissances à ce sujet.

Adapter au mieux l'intensité d'éclairage au besoin réel d'éclairage nécessite une réflexion élargie. A-t-on besoin de lire un journal en pleine rue ou dans les parcs au beau milieu de la nuit ? Une réduction de la puissance nominale des lampes utilisées devrait être envisagée en fonction du contexte.

Cette réflexion peut également être menée dans des contextes où le besoin d'éclairage est seulement ponctuel. Il n'est certes pas question de mettre la sécurité des piétons en jeu, mais est-il nécessaire d'éclairer à pleine puissance un passage piéton situé sur une route peu fréquentée ?



En fonction des contextes, la mise en place d'éclairages dits intelligents, adaptant l'intensité de l'éclairage au besoin réel du moment, devrait être étudiée. Il peut s'agir d'une augmentation de l'éclairage à l'approche de passants ou de véhicules à l'aide d'éléments réfléchissants. À noter que si le prix et la faisabilité technique font partie de la réflexion, les bénéfices environnementaux et financiers peuvent être importants, et l'investissement rapidement compensé.

En résumé, il est ici question d'adapter les éclairages aux besoins réels par le réglage de la puissance nominale des lampes et par l'ajustement temporel de l'intensité de chacune d'entre elles. Les lampes à sodium supportent bien cette diminution de puissance.

Recommandation 6

Sensibilisation et communication

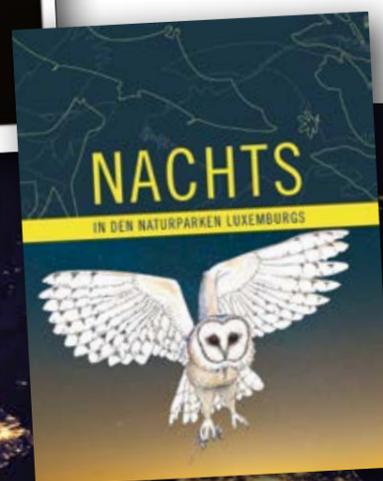
Les différentes recommandations formulées dans les pages précédentes impliquent des changements dans les habitudes et les comportements, aussi bien des décideurs que des citoyens. La mise en place d'actions de sensibilisation à cette problématique et aux solutions envisageables est un point clé de l'adhésion du public à une meilleure prise en compte de cette thématique.

Des actions de sensibilisation ont déjà été menées au Luxembourg en 2009 (Dark skies awareness) et plus récemment dans le cadre du projet « INTERREG Europe Night Light » <http://www.darkskiesawareness.org/faqs.php>. Ce type d'initiative est à encourager et à développer ailleurs au Luxembourg. Il est essentiel que la communication soit faite sur la base d'objectifs et de messages clairs. C'est de cette manière que les citoyens pourront s'identifier aux activités et au plan d'action à mettre en place.

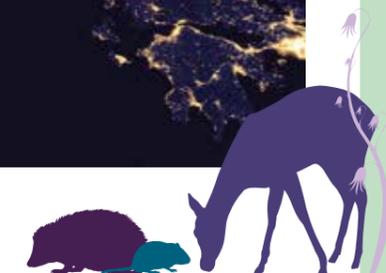
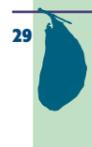
La multiplication des moyens et des canaux de communication doit prendre des formes variées afin de toucher des publics diversifiés : brochures lors d'événements grand public, partage de vidéos par les réseaux sociaux ou encore programmes de conférences.

Dans ce contexte, le partage de bonnes pratiques et la présentation de cas concrets de prise en main de cette thématique par les pouvoirs locaux est un bon moyen d'encourager la prise en compte de cette thématique.

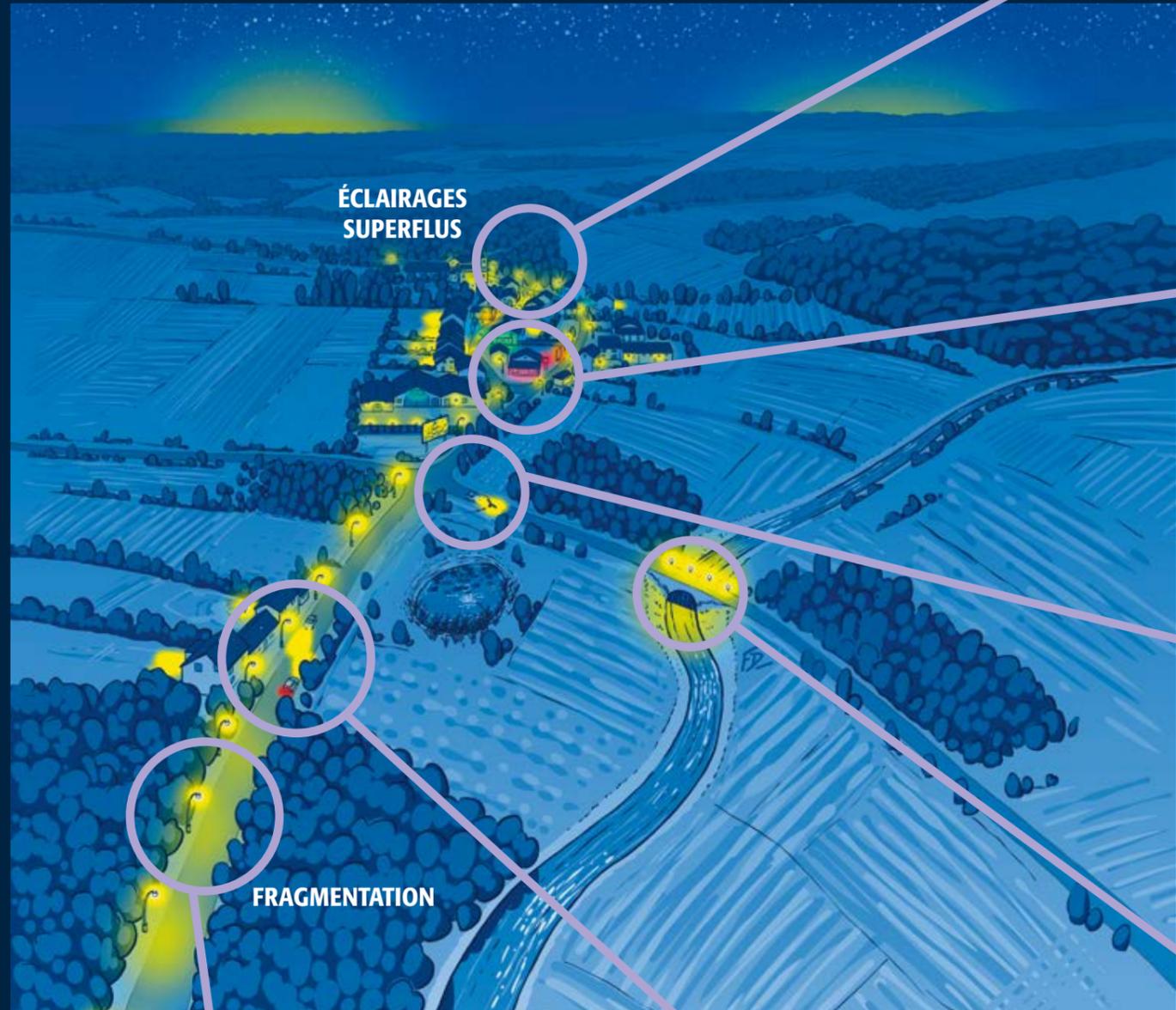
Ces actions de sensibilisation offriront aux citoyens et aux acteurs publics l'occasion de réfléchir à leurs propres comportements et à leur attitude vis-à-vis de la sobriété lumineuse.



©NASA



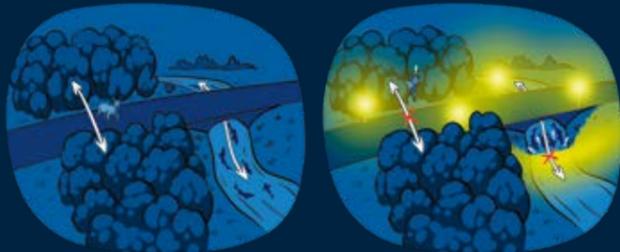
Pollution lumineuse, une réelle menace



ÉCLAIRAGES SUPERFLUS

FRAGMENTATION

LA FRAGMENTATION DES HABITATS CONCERNE TOUS LES ANIMAUX



La pollution lumineuse participe à la fragmentation des habitats naturels, l'une des principales causes de la perte de biodiversité p. 17

MENACES SUR LES AMPHIBIENS



Perturbation des déplacements, baisse de la reproduction, alimentation difficile p. 11

MENACES SUR LES CHAUVES-SOURIS



Rétrécissement des zones et périodes de chasse, désorientation p. 12

MENACES SUR LES INSECTES



Épuisement, grillés par la chaleur, chassés p. 10

MENACES SUR LES OISEAUX



Altération des périodes d'activité, augmentation de la mortalité, désorientation p. 9

MENACES SUR LES POISSONS



Perturbation des rythmes biologiques, baisse de la reproduction p. 14

Des solutions existent

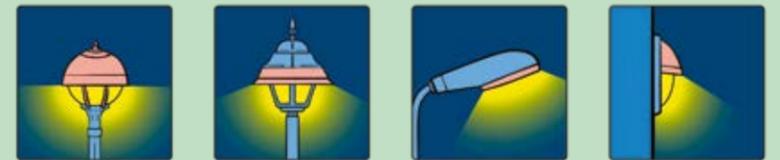
N'éclairer que ce qui est nécessaire p. 22



N'éclairer que quand c'est nécessaire p. 23



Utiliser des structures d'éclairage adaptées p. 24



Utiliser une qualité de lumière adaptée p. 26



Adapter l'intensité d'un éclairage p. 27



Sensibiliser & communiquer p. 28



Pollution lumineuse, des corridors écologiques rompus

La pollution lumineuse affecte la faune et la flore au niveau des individus, mais elle a également un impact significatif à plus large échelle sur les populations et les écosystèmes.

Pour accomplir leur cycle de vie, de nombreuses espèces ont besoin de se déplacer (zone de reproduction, recherche de nourriture, etc.), elles empruntent pour ce faire des corridors écologiques. Ces corridors relient entre eux des réservoirs de biodiversité et sont ainsi essentiels aux déplacements des espèces.

La pollution lumineuse peut créer une barrière infranchissable dans ces corridors qui perdent ainsi leur fonctionnalité. À terme, la survie de nombreuses espèces est menacée.

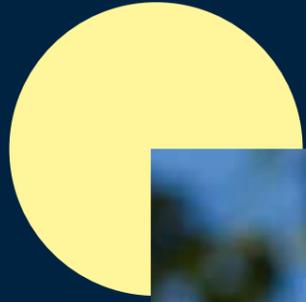
Une vue satellite du pays permet de mieux appréhender le couvert végétal et de distinguer les cours d'eau.



Les corridors écologiques sont ici matérialisés en vert (couvert végétal) et bleu (cours d'eau). Ils tissent, à l'échelle du pays, un maillage assez dense indispensable à la bonne santé des espèces et des écosystèmes.

Représentée en jaune sur la carte, la pollution lumineuse est celle qui est visible depuis l'espace. Cette image ne rend pas compte des perturbations qui existent à l'échelle locale : en effet, les données disponibles ne permettent d'obtenir qu'une illustration à large échelle.

Concrètement, dans les zones fortement éclairées, au sud-ouest du pays et sur un axe nord-sud, un certain nombre d'espèces trouve ses voies de déplacements « endommagées ».



Aveuglée par la lumière des phares des voitures, la chouette effraie est souvent incapable d'échapper aux collisions.
© Danny Moore de Pixabay





Glossaire

Alevin : chez les poissons, stade de développement précoce après l'éclosion des œufs.

Connectivité du paysage : terme d'écologie. Façon dont le paysage facilite, limite ou empêche les mouvements d'individus entre populations locales.

Décalage phénologique : la phénologie est l'étude des phénomènes périodiques au sein du monde vivant, le plus souvent à l'échelle annuelle, par exemple l'apparition des feuilles chez les plantes, la reproduction chez les oiseaux, etc. Des perturbations environnementales peuvent entraîner des modifications des périodes naturelles d'apparition de certains de ces phénomènes. Ces modifications temporelles sont appelées décalages phénologiques.

Externalité : conséquence directe, positive ou négative, d'une action sur une entité (personne, chose, environnement, etc.) sans que cette entité n'ait un lien avec l'action d'origine.

Fragmentation des habitats et du paysage : terme d'écologie. Processus au cours duquel les habitats d'espèces et le paysage sont progressivement morcelés, avec pour conséquence une augmentation de l'isolement entre populations locales (induite par une réduction de la facilité de déplacement entre les différentes zones d'habitat).

Habitat (d'espèce) : terme d'écologie. Un habitat réunit l'ensemble des êtres vivants et leurs interactions et l'ensemble des éléments physiques ou chimiques.

Horloge biologique : mécanisme physiologique permettant d'adapter le fonctionnement des organismes aux rythmes cycliques naturels (cycle jour/nuit, saison, etc.).

Longueur d'onde : la lumière est une onde électromagnétique. La longueur d'onde est l'une des caractéristiques propres à chaque onde mesurant la distance entre deux cycles consécutifs. À chaque longueur d'onde correspond une couleur.

Métopopulation : terme d'écologie. Ensemble de populations d'individus d'une même espèce séparées spatialement ou temporellement et étant interconnectées par des mouvements d'individus.

Migration : terme d'écologie. Déplacement, voire un péripère, souvent sur de longues distances, à caractère périodique qui implique un retour régulier dans la région de départ (migration des oiseaux).

Photopériode : rapport entre la durée du jour et la durée de la nuit. Ce rapport conditionne de nombreuses activités physiologiques et écologiques comme la reproduction, la migration, l'entrée en hibernation, la floraison, etc.

Phototaxie : phénomène par lequel des cellules corporelles, des bactéries ou d'autres organismes uni- ou pluricellulaires (plantes, champignons, animaux) se dirigent ou dirigent leurs mouvements en fonction de la lumière présente dans leur environnement.

Pollution lumineuse : changement des niveaux naturels de lumière dans les paysages nocturnes par des sources d'éclairage artificiel.

Réseau écologique : terme d'écologie. Complexe constitué par la somme (physique et fonctionnelle) des infrastructures naturelles. Il est visible à nos yeux (une vallée, un fleuve, une bande boisée) ou non (le corridor de migration d'une espèce de papillon), mais il correspond à une réalité écologique.

Service écosystémique : contribution qu'apportent les écosystèmes au bien-être de l'humanité.

Spectre lumineux : décomposition en composantes monochromatiques (différentes longueurs d'onde) de la lumière.

Thermorégulation : mécanisme régulateur par lequel la température interne du corps des animaux homéothermes reste constante.

ULOR : *Upward Light Output Ratio*, proportion de flux des lampes de tous les luminaires considérés qui est émis au-dessus du plan horizontal passant par les luminaires dans leur position d'installation.



Bibliographie

Altermatt et Ebert (2016) Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Biology letters* 12.

Arletaz et al. (2000) Competition for food by expanding pipistrelle bat populations (*Pipistrellus pipistrellus*) might contribute to the decline of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*). *Biological conservation* 93. pp 55-60.

Azam et al. (2015) Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? *Global Change Biology* 21 pp 4333-4341.

Azam et al. (2016) Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape Ecology* 31, pp 2471-2483.

Baur et al. (2004) La biodiversité en Suisse. Etat, sauvegarde, perspectives. Haupt Verlag.

Beaudoin (1985) Le comportement des animaux en présence de sources lumineuses (théorie de l'éclairage directionnel). *Cahier de liaison de l'OIPE* 19 pp 25-41.

Bennie J, Davies TW, Cruse D, Inger R, Gaston KJ (2015) Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London Biology* 370.

Bliss-Ketchum et al. (2016) The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure. *Biological Conservation* 199 pp 25-28.

Boldogh et al. (2007) The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta chiropterologica* 9 pp 527-534.

Brüning et al. (2015) Spotlight on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress. *Science of the Total Environment* 511 pp 516-522.

Brusseaux (1991) Éclairages publics et protection des Lépidoptères nocturnes. *Alexanor*. 17 pp 195-197.

Candido R, Allen D (2006) Nocturnal hunting by peregrine falcons at the Empire State Building, New York City.

Chepesiuk R. (2009) Missing the dark: health effects of light pollution. *Environmental health perspectives* 117 A20-A27.

Clarke (1983) Moonlight's influence on predator/prey interactions between short-eared owls (*Asio flammeus*) and deer mice (*Peromyscus*

maniculatus). *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 13 pp 205-209.

Da Silva et al. (2015) Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London Biology* 370.

Davies et al. (2012) Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biology letters*. 4 pages.

Davies et al. (2013) Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Global change biology* 19 pp 1417-1423.

Decandido et Allen (2006) Nocturnal hunting by peregrine falcons at the Empire State Building, New York City. *The Wilson Journal of Ornithology*. 118 pp 53-58.

Dupont SM, Guinnefollau L, Weber C, Petit O (2019) Impact of artificial light at night on the foraging behaviour of the European Hamster: consequences for the introduction of this species in suburban areas. *Rethinking Ecology* 4 pp 133-148.

Eisenbeis (2006) Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. In: Rich & Longcore, editors. *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press. Washington D.C. pp 281-304.

Eisenbeis et Hassel (2000) Zur Anziehung nachtaktiver Insekten durch Straßenlaternen—eine Studie kommunaler Beleuchtungseinrichtungen in der Agrarlandschaft Rheinhessens [Attraction of nocturnal insects to streetlights: a study of municipal lighting systems in a rural area of Rheinhessen]. *Natur Landsch* 75 pp 145-156.

Falchi et al. (2016) The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2.

Fahrig (2003) Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 34 pp 487-515.

Gaston et al. (2014) Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia* 176 pp 917-931.

Gaston et Bennie (2014) Demographic effects of artificial nighttime lighting on animal populations. *Environmental Reviews* 22 pp 323-330.

Gaston et al. (2013) The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews* 88 pp 912-927.

Gaston et al. (2012) Reducing the ecological

consequences of night-time light pollution: options and developments. *Journal of applied ecology* 49 pp 1256-1266.

Gaynor et al. (2018) The influence of human disturbance on wildlife nocturnality. *Science* 360 pp 1232-1235.

Gigleux et De Billy (2013) *Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques - Cas de la faune piscicole*. CETE de l'Est & ONEMA. 25 pages.

Granier (2012) *Comment prendre en compte la pollution lumineuse dans l'identification des continuités écologiques ? Université Paris Diderot. Application au territoire du Parc naturel régional des Causses du Quercy*. 188 pages.

Guinard et Pineau (2006) Mesures de limitation de la mortalité de la Chouette effraie sur le réseau routier. Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA). 11 pages.

Haim et al. (2004) Rodent pest control: the use of photoperiod manipulations as a tool. In: Pelz et al. (eds) *Advances in vertebrate pest management III*. Filander, Fürth, pp 29-38.

Haim et al. (2005) Seasonality and seasons out of time—the thermoregulatory effects of light interference. *Chronobiology International* 22 pp 59-66.

Hölker et al. (2010) Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology and Evolution* 25.

Hungerbühler, R.; MORICI, L. (2006): *Soziologische Beobachtung zur Wahrnehmung nächtlicher Landschaften*. In: ZUMTHOR, P. et al. (Hrsg.): *Wieviel Licht braucht der Mensch, um leben zu können, und wieviel Dunkelheit?* Zürich: vdf Hochschulverlag, 162-184.

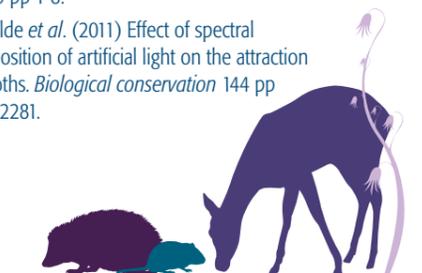
Jedidi et al. (2015) La pollution lumineuse - Entre écologie et santé. *Revue Médicale de Liège* 70 pp 557-56.

Kempenaers et al. (2010) Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds. *Current Biology* 20 pp 1735-1739.

Knop et al. (2017) Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature* 548 pp 206-209.

Lacoeuilhe et al. (2014) The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context. *PLOS One* 9 pp 1-8.

Langevelde et al. (2011) Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological conservation* 144 pp 2274-2281.



Licht, Raum, Stadtplanung GmbH (2018) Leitfaden „Gutes Licht“ im Außenraum für das Großherzogtum Luxemburg. Editeur : Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, Ministère du Développement durable et des Infrastructures, Département de l'environnement.

Longcore et Rich (2004) Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2 pp 191-198.

Lyytimäki (2013) Nature's nocturnal services: Light pollution as a non-recognised challenge for ecosystem services research and management. *Ecosystem Services* 3 pp e44-e48.

Malnas *et al.* (2011) Bridges as optical barriers and population disruptors for the mayfly *Palingenia longicauda*: an overlooked threat to freshwater biodiversity? *Journal of Insect Conservation* 15 pp 823-832.

MASSDF - Ministère des Affaires sociales, de la Santé et des Droits des femmes (2014) Santé-Environnement. 3^e plan national 2015 > 2019. 106 pages.

Narisada K.; Schreuder D. (2004): Light Pollution Handbook. Niederlande: Springer.

Obrtel et Holisova (1981) The Diet of Hedgehogs in an Urban Environment. *Folia Zoologica* 30 pp 193-201.

Pawson et Bader (2014) LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological applications* 24 pp 1561-1568.

Perkin *et al.* (2011) The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. *Ecosphere* 2, 16 pages.

Picchi *et al.* (2013) Fireflies and land use in an urban landscape: the case of *Luciola italica* L. (Coleoptera: Lampyridae) in the city of Turin. *Journal of Insect Conservation* 17 pp 797-805.

Quémard *et al.* (2015) Éclairage du XXI^e siècle et biodiversité – Pour une meilleure prise en compte des externalités de l'éclairage extérieur sur notre environnement.

Rich et Longcore (2006) Ecological consequences of artificial night lighting. Island Press, Washington, D.C., USA. 458 pages.

Sibley (2008) Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité. Synthèse bibliographique. Muséum national d'Histoire naturelle. 30 pages.

Sordello (2013) Effet fragmentant de la lumière et impacts sur le déplacement des espèces. Muséum national d'Histoire naturelle. Présentation lors de la journée d'échanges du Centre de ressources TVB.

Sordello *et al.* (2014) Effet fragmentant de la lumière artificielle. Quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques? Muséum national d'Histoire naturelle, Centre de ressources Trame verte et bleue. 31 pages.

Sordello (2011) Six propositions pour réduire les nuisances lumineuses sur la biodiversité dans les espaces naturels. Muséum national d'Histoire naturelle. 12 pages.

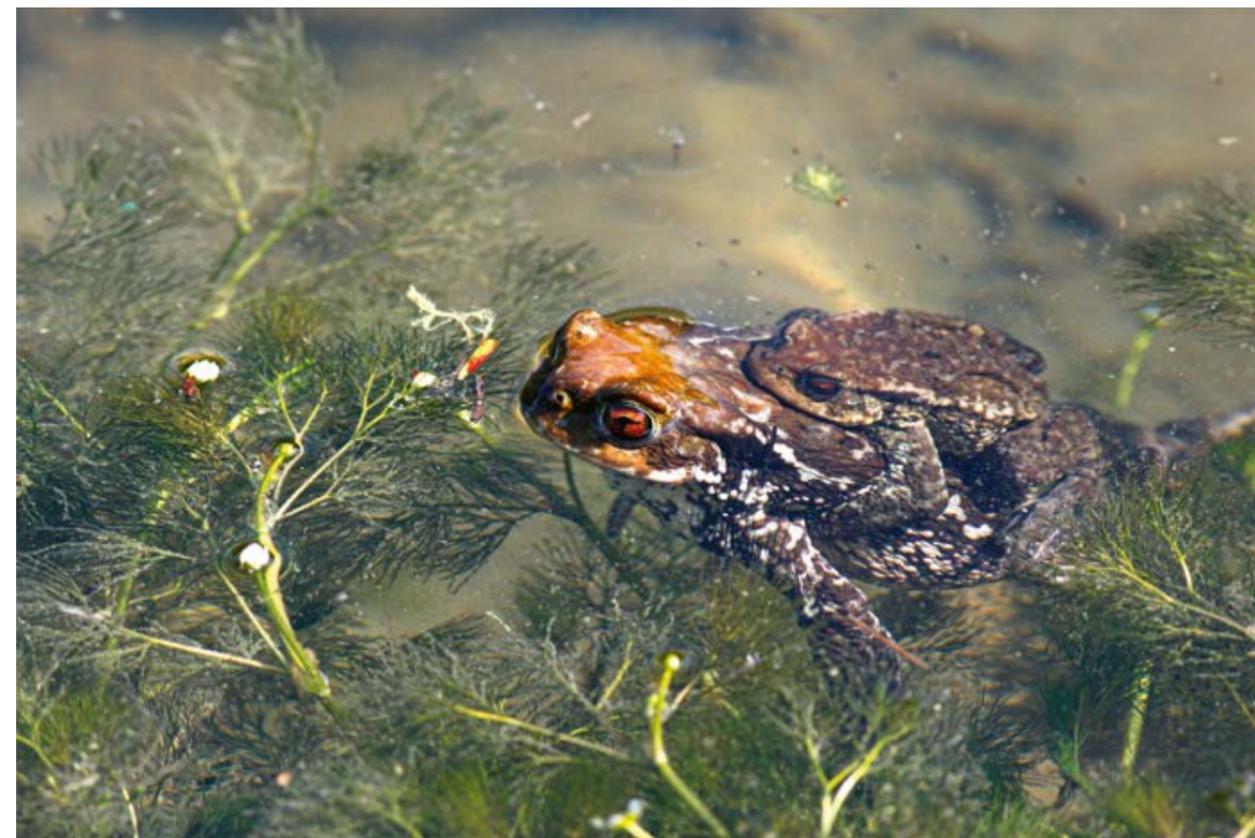
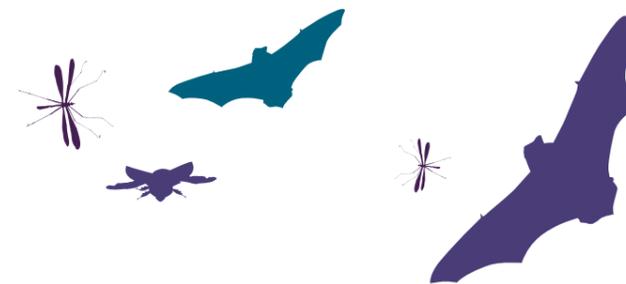
Steinbach *et al.*, UK: The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis

Stone *et al.* (2009) Street lighting disturbs commuting bats. *Current biology* 19 pp 1123-1127.

Stone *et al.* (2012) Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Global Change Biology* 18 pp 2458-2465.

Van Doren *et al.* (2017) High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. *PNAS* 114 pp 11175-11180.

Zollner et Lima (1999) Illumination and the perception of remote habitat patches by white-footed mice. *Ecological applications* 58 pp 489-500.



Accouplement, ou amplexus, de crapauds communs, espèce sensible à la pollution lumineuse.
G. Tavan/Biotope

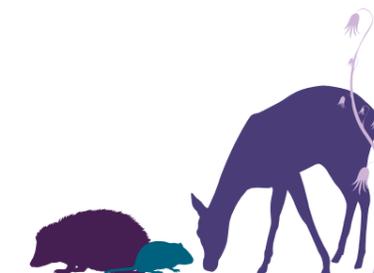
Éditeurs :
Administration de la nature et des forêts, Service de la nature
81 avenue de la Gare
L-9233 Diekirch
www.emwelt.lu

Concept, contenu, mise en page :
Biotope Environnement : Quentin Dubois, Julien Renglet
Biotope Communication Édition : Sandrine Navarre, Béatrice Garnier, Guillaume Salmon
Illustrations : François Dolambi
Relecture :
T. De Sousa, L. Lestang, S. Cellina, M. Geniez
Imprimerie: HEINTZ (Luxembourg)

1^{re} édition en français, Luxembourg, 2021

© Tous droits, en particulier les droits de reproduction, de diffusion et de traduction, réservés.

Cette brochure est imprimée sur du papier 100% recyclé.





Administration
de la nature et des forêts

Contact

81, rue de la Gare

L-9233 Diekirch - Luxembourg

Tél.: (+352) 247-56600 - Fax : (+352) 247-56651

Site web : www.environnement.public.lu



FD