

Résumé informatif de l'étude :

L'évaluation de l'impact de la ALAN sur les lépidoptères nocturnes dans les zones rurales pyrénéennes

Pirineos La Nuit EFA233/16



Novembre 2020

Carlos Armendariz Garraza¹, Iker Pardo Guereño² y Kike Vergara Jimenez¹

¹Gestión Ambiental de Navarra (GAN-NIK);

²Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV-EHU). Dpto. Biología Vegetal y Ecología – Landareen Biologia eta Ekologia Saila.

Interreg
POCTEFA



Gobierno de Navarra  Nafarroako Gobernua



Nafarroako Ingurumen Kudeaketa, S.A.  Gestión Ambiental de Navarra, S.A.

 Euskal Herriko Unibertsitatea

Ce document est un résumé informatif de l'étude «Evaluation de l'impact de l'ALAN sur les lépidoptères nocturnes dans les noyaux ruraux pyrénéens (Pyrénées La Nuit EFA233 / 16)», (Assistance technique - Code OTRI: 2020.0048)

L'étude originale fait partie des travaux scientifiques proposés par la société publique navarraise GAN-NIK dans le cadre du projet européen «[Pirineos La Nuit](#). Stratégie pyrénéenne de protection et d'amélioration des conditions de l'environnement nocturne» POCTEFA EFA233 / 16 PLN, financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER). Ce projet a été programmé dans le deuxième appel du programme Interreg V-A ESPAGNE-FRANCE-ANDORRE (POCTEFA 2014-2020).

ÍNDICE

INTRODUCTION.....	4
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	6
ZONE D'ÉTUDE	7
MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE (TRAPS)	10
RÉSULTATS	11
ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES.....	14
CONCLUSIONS.....	18
RECOMMANDATIONS POUR LA GESTION DE L'ÉCLAIRAGE.....	20

INTRODUCTION

L'altération des niveaux d'éclairage naturel des paysages nocturnes provoquée par des sources lumineuses d'origine anthropique a un impact potentiel sur les espèces fauniques crépusculaires et nocturnes des habitats affectés. L'ALAN (lumière artificielle la nuit), comme on appelle communément ce type de pollution lumineuse, est causée par de multiples sources, y compris l'éclairage public et routier. Ces sources contribuent à l'ALAN à la fois directement et indirectement par la lumière diffusée dans l'atmosphère. On estime que plus de 88% de la surface de l'Europe souffre de ce type de pollution lumineuse, même les espaces naturels n'en sont pas exemptés. Au cours des dernières décennies, le niveau d'exposition à l'ALAN dans les écosystèmes (semi) naturels a considérablement augmenté et on s'attend à ce qu'il continue d'augmenter à mesure que la population et les espaces urbanisés autour de ces écosystèmes continuent d'augmenter.

Effets d'ALAN sur les macrolépidoptères nocturnes

Depuis le milieu du siècle dernier, de nombreuses preuves de l'impact d'ALAN sur un large spectre d'êtres vivants (plantes, invertébrés, mammifères, oiseaux, etc.) se sont accumulées. Plus récemment, ses effets sur les processus écologiques et les services écosystémiques fondamentaux (par exemple la pollinisation) ont été décrits, comme conséquence des effets dits en cascade. Les impacts biologiques les mieux documentés comprennent les changements dans la phénologie, la prédation, la reproduction, les capacités d'orientation et de migration, le comportement, la communication et la physiologie des êtres vivants.

Les macrolépidoptères nocturnes (grands papillons de nuit) sont l'un des groupes de faune les plus vulnérables aux effets de l'ALAN, car nombre de ces espèces présentent une phototaxie positive. Cette tendance des individus à voler de l'obscurité vers des sources lumineuses fait que leur activité normale est altérée par la pollution lumineuse. En particulier, l'ALAN peut interférer avec les fonctions de base telles que l'alimentation et la reproduction. Ces effets sont bien documentés, au moins dans les noctuides, l'un des groupes de macrolépidoptères les plus abondants et les plus divers.

Une fois que les individus volent vers la source de lumière artificielle, la majorité sont piégés dans l'environnement de la lampe et peuvent mourir d'épuisement. À certaines occasions, des individus entrent en collision avec le luminaire et meurent de brûlures. Les

individus qui parviennent à s'échapper de la zone d'influence de la lumière cherchent refuge dans la végétation et / ou dans les zones sombres voisines, où ils restent au repos. Ces spécimens peuvent rester inactifs pendant un certain temps, parfois toute la nuit, et même retourner dans la lumière après avoir retrouvé leur activité. Dans les deux cas, les individus sont temporairement incapables d'accomplir les fonctions de base et pendant cette période sont plus vulnérables aux prédateurs. D'autres effets indirects d'ALAN sur la ponte, le risque d'infection et les relations trophiques ont également été décrits dans la littérature.

Types de lumière artificielle

Le degré d'attraction que les sources ALAN exercent sur les insectes nocturnes en général, et les macrolépidoptères en particulier, dépend principalement de l'intensité et de la composition du spectre lumineux de la source lumineuse. Les macro-mites sont particulièrement attirées par la lumière ultraviolette. Cependant, des études récentes ont montré que les émissions dans la gamme bleue et verte peuvent également être très attractives pour ce groupe de lépidoptères.

Une part importante de l'ALAN des centres urbains et ruraux provient de l'éclairage public, dont la composition lumineuse a considérablement changé au cours des dernières décennies. À partir des années 1970, les lampes à vapeur de sodium haute pression (VSAP; caractérisées par une lumière chaude jaune-orange) ont commencé à proliférer dans toute l'Europe, au détriment des lampes à vapeur de mercure blanches traditionnelles (MV) et des halogénures métalliques (HM), bien plus encore attrayant pour les insectes car ils émettent un rayonnement dans la gamme des ultraviolets (UV). Actuellement, avec l'avènement de la technologie des diodes électroluminescentes (ci-après LED), la tendance mondiale a été d'utiliser ce type de lampe beaucoup plus efficace dans l'éclairage public. Bien que le spectre de la LED blanche (le type de LED le plus fréquemment utilisé pour l'éclairage) ne contienne pas de lumière UV, les émissions couvrent tout le spectre visible (400-700 nm), avec des pics en bleu et vert. Bien que les lampes à LED blanches soient moins attrayantes pour certains types d'insectes que les lampes VM et HM, de nombreuses études mettent en garde contre les conséquences néfastes que l'utilisation généralisée de ce type d'éclairage pourrait avoir sur la biodiversité (Davies et al., 2013; Donners et al., 2018; van Grunsven et al., 2020).

À l'échelle régionale, il n'y a pas eu de cohérence dans le type de lampe utilisée pour l'éclairage public: les types de lampes varient d'une population à l'autre et même au sein d'un même noyau. En 2007, le règlement sur l'efficacité énergétique des installations

d'éclairage extérieur a été approuvé (Décret Foral 199/2007), qui prévoyait l'utilisation de lampes à vapeur de sodium haute et basse pression au détriment des lampes VM et HMC (ce dernier type n'est autorisé que dans les localités avec moins de 300 habitants). Le Plan Énergétique de Navarre Horizonte 2030 approuvé par accord du gouvernement de Navarre le 24 janvier 2018 envisage des mesures visant la consommation et l'économie d'énergie, prônant «de mettre en œuvre (la LED) petit à petit mais uniquement dans les nouvelles installations et lorsque les anciennes installations sont déjà amortis». Suite à ces recommandations, certaines villes ont commencé à remplacer les anciennes lampes à décharge par des lampes à LED blanches. Dans le cas de la vallée de Roncal, l'obtention du label «Starlight Tourist Destination» pour la protection du ciel étoilé contre la pollution lumineuse (<https://www.fundacionstarlight.org>), a motivé plusieurs localités à avoir commencé à remplacer les lampes existantes par un nouveau type de LED appelé PC-Amber (Phosphor-Converted Amber). C'est un système d'éclairage avec de faibles émissions d'ondes courtes et une émission maximale dans des couleurs chaudes. Ce type de lampe a suscité de grandes attentes en raison de sa faible interférence sur les observations astronomiques (il est certifié par le Bureau technique pour la protection de la qualité du ciel de l'Instituto de Astrofísica de Canarias). De plus, en émettant à peine de la lumière en dessous de 500 nm, il est supposé avoir une incidence plus faible sur la faune nocturne que les autres sources lumineuses existantes. Plusieurs centres situés dans des milieux naturels protégés en Catalogne et aux îles Canaries ont déjà commencé à installer ce type de lampe. Cependant, au-delà des attentes théoriques, jusqu'aux travaux actuels, nous n'avons aucune preuve d'études empiriques qui soutiennent le plus faible impact de ce type de lampe sur la faune nocturne.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif général de cette étude était d'évaluer le degré d'attraction exercé par les différents types de lampes utilisées dans l'éclairage public urbain sur les macrolépidoptères nocturnes des Pyrénées occidentales (Navarre). C'est l'une des régions les moins polluées par la lumière de la péninsule ibérique.

La plupart des localités pyrénéennes sont de petite taille et se situent dans une matrice d'habitats naturels contenant des éléments remarquables de biodiversité. Il s'agit notamment des populations de *Graellsia isabellae* et *Proserpinus proserpina*, espèces de macrolépidoptères d'intérêt communautaire selon la directive Habitats 92/43 / CEE et inscrites sur la liste des espèces sauvages sous le régime de protection spéciale (décret

royal 139/2011) (figure 1)



Figure 1. Espèces d'intérêt communautaire présentes dans la zone d'étude: *Graellsia isabellae* (à gauche) et *Proserpinus proserpina* (à droite)

ZONE D'ÉTUDE

L'étude a été réalisée dans 12 communes des Pyrénées de Navarre (figure 2), et les critères suivants ont été pris en compte pour sa sélection:

- i. Existence de lieux de grande valeur pour la conservation de la biodiversité (zones spéciales de conservation - réseau Natura 2000)
- ii. Présence d'espèces cataloguées
- iii. Représentation de la typologie des lampes existantes dans les Pyrénées de Navarre.

Toutes les localités sélectionnées sont donc situées à l'intérieur ou dans les limites des sites naturels du réseau Natura 2000, à côté de vastes massifs forestiers de pin sylvestre qui forment l'habitat potentiel de *G. isabellae* et à côté de rivières ou de régates habitées par *P. prosepine* (Tableau 1)

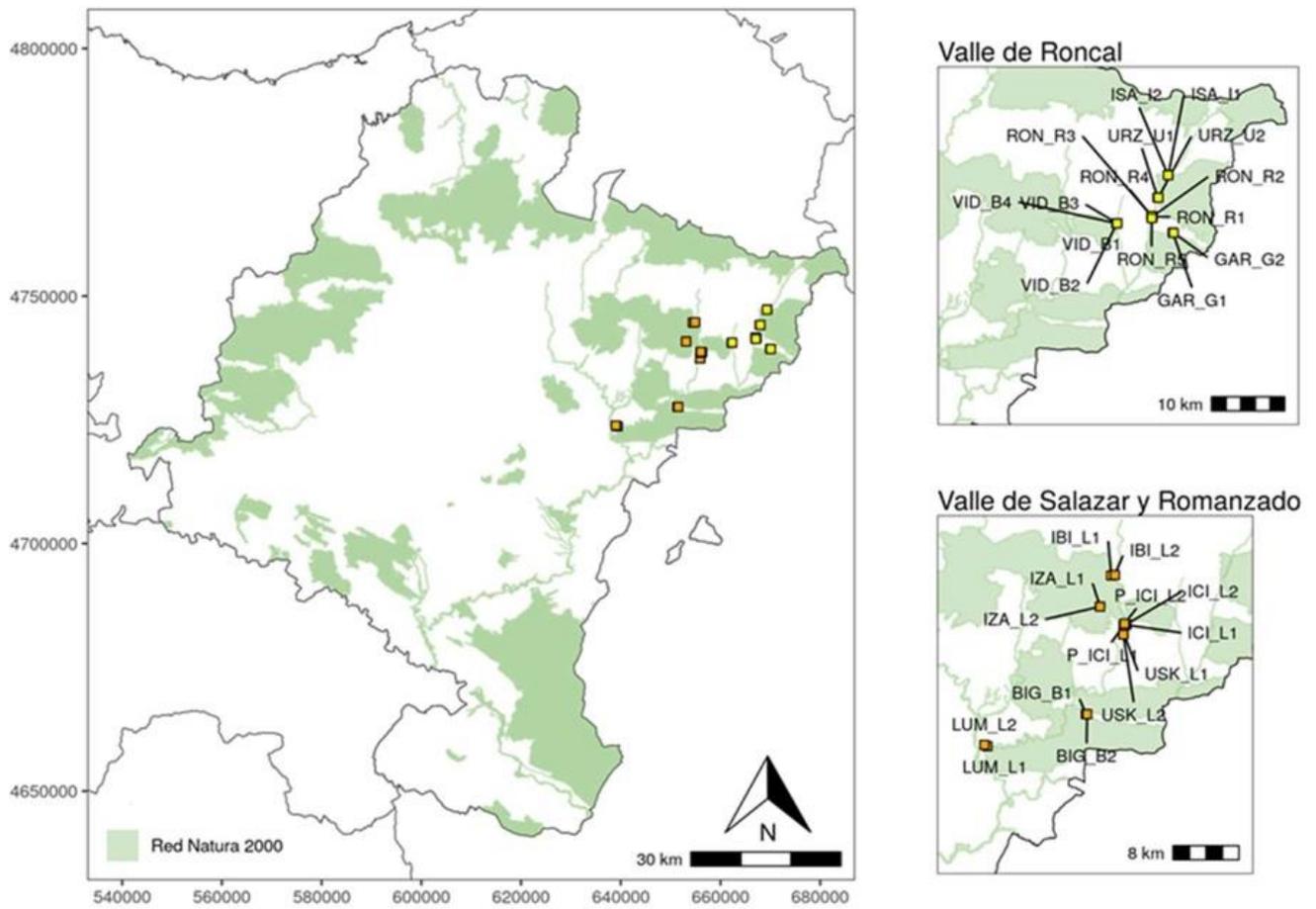


Figure 2. Localisation des points de prélèvement par rapport au réseau Natura 2000

Tableau 1. Situation des lampadaires échantillonnés avec des lampes à vapeur de mercure (VM), aux halogénures métalliques céramiques (HMC), à vapeur de sodium haute pression (VSAP), à LED blanches et à LED PC-Amber. Tous les lampadaires sont situés à proximité des massifs de pins habités par *Graellsia isabellae* (GRAISA) et certains d'entre eux traversés par des rivières ou des régates avec une présence confirmée de *Proserpinus proserpina* (PROPRO).

Localidad	Código farola	Coordenadas		Año	Campaña		Tipo de lámpara	Especie catalogada
		X	Y		Inicio	Fin		
Garde	GAR_G1	669968	4739333	2018	06-05-2018	04-07-2018	HMC	GRAISA PROPRO
	GAR_G2	670084	4739283					
Isaba / Izaba	ISA_I1	669359	4747293	2018	06-05-2018	04-07-2018	VM	GRAISA PROPRO
	ISA_I2	669319	4747243					
Bigüezal	BIG_B1	651385	4727614	2018	06-05-2018	04-07-2018	VSAP	GRAISA PROPRO
	BIG_B2	651518	4727601					
Lumbier / Irunberri	LUM_L1	639369	4723677	2018	06-05-2018	04-07-2018	VSAP	GRAISA PROPRO
	LUM_L2	639000	4723846					
Urzainqui / Urzainki	URZ_U1	667887	4744149	2018	06-05-2018	04-07-2018	VSAP	GRAISA PROPRO
	URZ_U2	667990	4744158					
Ibilicieta / Ibiltzieta	IBI_L1	654458	4744633	2019	02-05-2019	01-07-2019	LED blanco	GRAISA PROPRO
	IBI_L2	654909	4744684					
Uscarrés / Uskartze	USK_L1	655960	4737613	2019	02-05-2019	01-07-2019	LED blanco	GRAISA
	USK_L2	655939	4739374					
Iciz / Izize	ICI_L1	656270	4738561	2019	02-05-2019	01-07-2019	VM	GRAISA
	ICI_L2	656308	4738631					
Izal / Itzalle	IZA_L1	653097	4740829	2019	02-05-2019	01-07-2019	VM	GRAISA PROPRO
	IZA_L2	653109	4740805					
Polígono Iciz / Izize	P_ICI_L1	655972	4738492	2019	02-05-2019	01-07-2019	VSAP	GRAISA PROPRO
	P_ICI_L2	656069	4738721					
Roncal / Erronkari	RON_R1	667196	4741544	2020	05-05-2020	29-06-2020	PC-Ámbar	GRAISA PROPRO
	RON_R2	667188	4741554					
	RON_R3	667047	4741618					
	RON_R4	667047	4741629					
	RON_R5	667096	4741308					
Vidángoz / Bidankoze	VID_B1	662245	4740581	2020	05-05-2020	29-06-2020	PC-Ámbar	GRAISA PROPRO
	VID_B2	662286	4740571					
	VID_B3	662342	4740605					
	VID_B4	662343	4740583					

MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE (TRAPS)

Pour évaluer l'attraction des différentes lampes sur les lépidoptères nocturnes, des pièges accrochés aux lampadaires ont été utilisés (figure 3).



Figure 3. Piège d'interception suspendu à un luminaire de type villa. Les insectes volants attirés par la lumière entrent en collision avec les panneaux et tombent au fond du piège. Ibilzieta (vallée de Salazar).

Des pièges ont été installés dans les différents types de lampes existant dans les villages pyrénéens de Navarre: vapeur de mercure (VM), halogénure métallique céramique (HMC), vapeur de sodium haute pression (VSAP), LED blanche et LED PC-Ambre. Les échantillonnages ont été réalisés en 2018, 2019 et 2020 (tableau 1).

Les pièges ont été placés début mai, coïncidant avec la période de vol de *G. isabellae* et *P. proserpina* (mai - juillet) et ils sont restés opérationnels pendant 59, 60 et 55 jours consécutifs au cours des campagnes 2018, 2019 et 2020, respectivement.

RÉSULTATS

Le nombre de captures dans les pièges installés dans les lampadaires s'élevait à un total de 2369 individus de 143 taxons appartenant à neuf ordres d'insectes différents. 82% des individus capturés étaient des lépidoptères (1625 macrolepidoptera et 318 microlepidoptera) et 14,5% des coléoptères (343). La plupart des captures de macrolépidoptères étaient concentrées dans seulement neuf familles. Il est à noter que près de la moitié (43%) des macrolépidoptères capturés appartenaient à la famille des Noctuidae. Le reste des familles de macrolépidoptères (12) ont été capturés occasionnellement (moins de 10 individus capturés par famille lors des prélèvements).

Nombre d'individus

La valeur moyenne des captures de macrolépidoptères était de 56 individus par casier, bien qu'une énorme variabilité ait été observée entre les lampadaires de différents endroits (intervalle de 0 à 331 individus) et avec différents types de lampes (figures 4 et 5). En moyenne, 96 individus ont été capturés dans des lampes VM, 111 dans des lampes HMC, 37 dans des lampes VSAP, 36 dans des lampes LED et 13 dans des lampes PC-Amber.

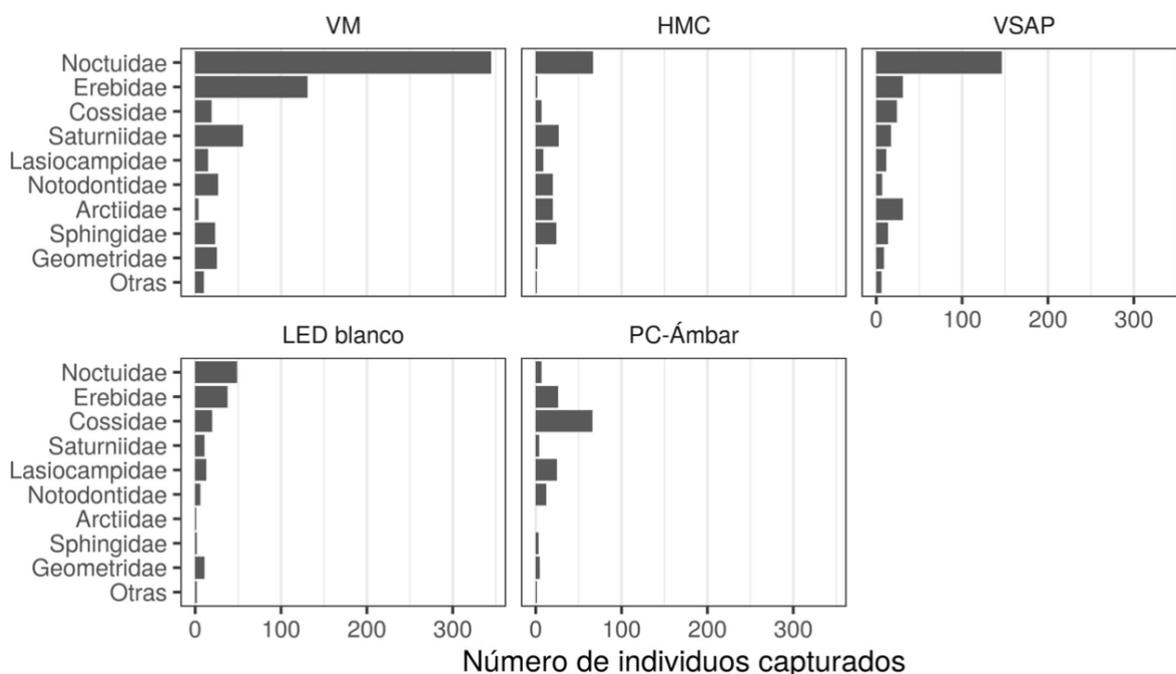


Figure 4. Nombre de captures cumulées par familles de macrolépidoptères et type de lampe.

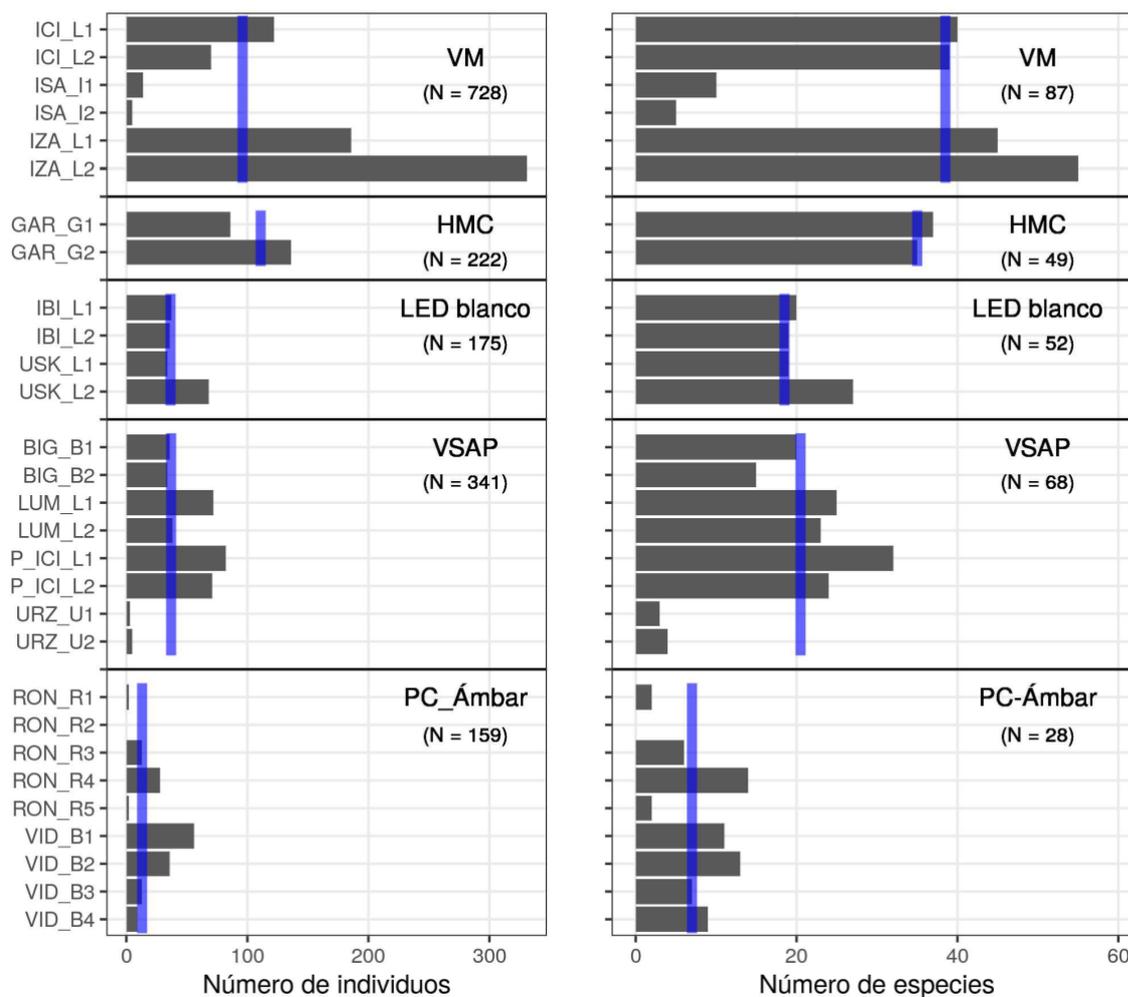


Figure 5. Nombre de captures de macrolépidoptères accumulés dans des lampadaires avec différents types de lampes. La bande verticale bleue correspond à la médiane du nombre d'individus capturés. À gauche le nombre d'individus et à droite le nombre d'espèces.

L'attrait rare des lampadaires VM situés à Isaba est remarquable, en raison du mauvais état d'entretien des lumières (usure). Dans ce type de lampes, le nombre de captures était positivement corrélé avec le niveau d'éclairage.

Aucune autre lampe parmi celles mentionnées ci-dessus n'a été mise en évidence d'un fonctionnement atypique.

Nombre d'espèces

Au niveau des espèces, plus de 50% des enregistrements de macrolépidoptères étaient concentrés dans seulement 14 des 135 espèces capturées. La gamme du nombre total de captures par espèce variait entre 31 et 129 individus, avec une moyenne de 62 captures totales par espèce et 5 par espèce et lampe. Le moyenne des captures pour le reste des espèces était de 5 individus, avec une prédominance de captures occasionnelles (1 à 2

individus)



Figure 6. Captures de macrolepidoptères le 15/05/2018 à Garde (vallée de Roncal). Exemple de l'intérieur d'un piège installé sous un lampadaire avec une lampe HM. Deux spécimens de *G. isabellae*, 3 de *Saturnia piri* et un de *Smerinthus ocellata* sont observés.

Le nombre d'espèces capturées a montré un schéma similaire à celui du nombre d'individus capturés (Figure 5), avec une moyenne plus élevée dans les lampes MV et HMC, suivies des LED blanches, VSAP et LED PC-Amber.

Le plus grand nombre de captures de *G. isabellae* a été enregistré dans des pièges attachés à des lampes MV, avec une moyenne de 3 individus par lampadaire. Dans les lampadaires avec lampes HMC, la moyenne était de 2 individus par lampe, tandis que dans les lampadaires avec LED et VSAP, la moyenne était inférieure à 1 individu. Dans les lampadaires équipés de lampes LED PC-Amber, aucune capture n'a été enregistrée.

Le fait qu'aucun spécimen de *P. proserpina* n'ait été capturé pourrait suggérer que cette espèce, avec une présence confirmée dans la zone d'étude (Armendariz, comm. Pers.), n'est pas affectée, au moins directement, par l'ALAN.



Figure 7. Luminaire très dangereux pour les espèces volantes car il a une lampe VM et une base ouverte. Les insectes, attirés par la lumière, pénètrent à l'intérieur et brûlent lorsqu'ils entrent en contact avec la lampe. Iziz (vallée de Salazar).



Figure 8. Spécimens morts de *G. isabellae* en raison de brûlures avec des lampes VM situées sous le lampadaire. Iziz (Vallée de Salazar).

ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Les différences dans le nombre d'individus et d'espèces capturés entre les types de lampes ont été analysées à l'aide de modèles mixtes linéaires généralisés.

Individus

Le modèle statistique final a indiqué un effet significatif du type de lampe sur la capture des macrolépidoptères. Les résultats des multiples comparaisons indiquent que les lampes PC-Amber et VSAP exercent une attraction significative entre 8 et 4 fois moins que les lampes MV (Figure 9). Comme prévu par le modèle, le nombre de captures attendues dans les lampes PC-Amber était également nettement inférieur à celui des lampes HMC, bien que dans ce cas, la différence soit marginalement significative.

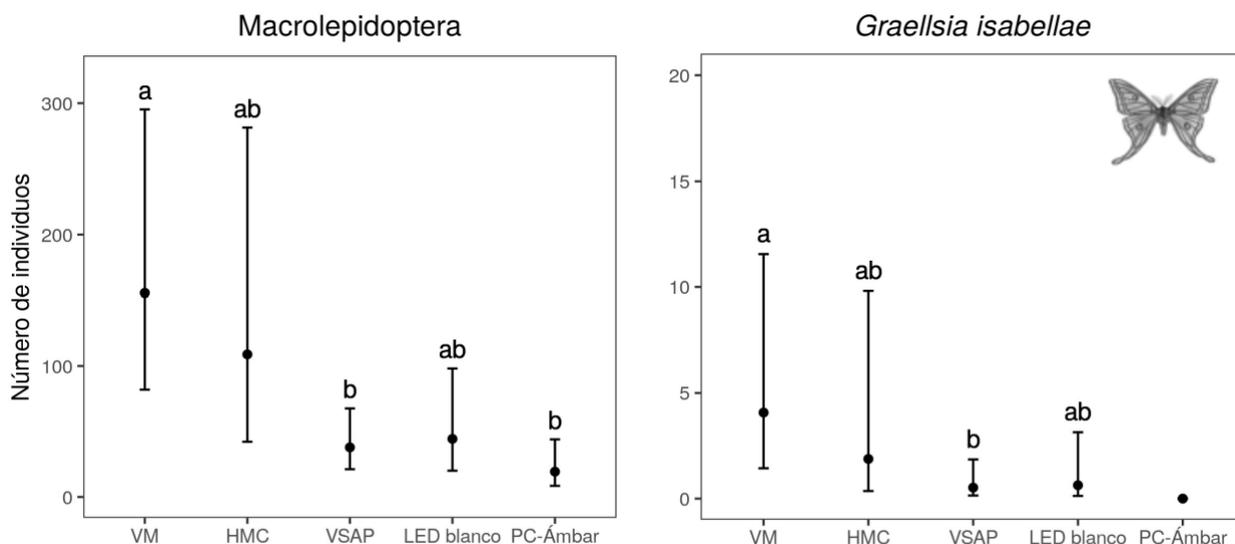


Figure 9. Prédiction des modèles linéaires généralisés mixtes ajustés sur le nombre d'individus capturés. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance (95%) de la prédiction transformée à l'échelle d'origine. Les paires de types de lampes avec des effets sensiblement différents ne partagent pas une lettre. Dans le cas de *Graellsia isabellae*, aucun spécimen n'a été enregistré dans les lampes PC-Amber et n'a donc pas été inclus dans le modèle.

Espèces

L'effet du type de lampe en termes de nombre d'espèces était également significatif. Dans ce cas, les lampes PC-Amber et les lampes VSAP ont exercé un effet d'attraction sur un nombre d'espèces nettement inférieur à celui observé dans les lampes VM. Au contraire, aucune différence significative n'a été trouvée en ce qui concerne les lampes HMC (Figure 10).

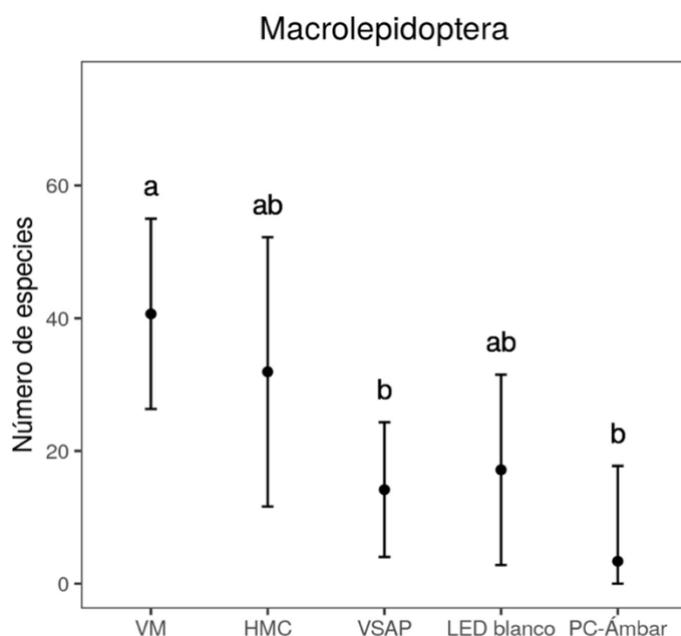


Figure 10. Prédiction de modèles mixtes linéaires généralisés ajustés sur le nombre d'espèces capturées. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance (95%) de la prédiction et ont été transformées à l'échelle d'origine. Les paires de types de lampes avec des effets sensiblement différents ne partagent pas une lettre.

Au niveau famille, un effet significatif du type de lampe a été retrouvé dans les principales familles. Dans tous les cas, l'attraction des lampes PC-Ambre était nettement inférieure à celle exercée par les lampes VM et, sauf dans les géométrides, également à celle exercée par les lampes HMC.

Dans le cas de *G. isabellae*, une fois que les lampadaires PC-Amber ont été exclus du modèle, où aucun spécimen de l'espèce n'a été capturé, seules des différences marginalement significatives ont été trouvées entre VM et VSAP, avec le nombre de captures attendues dans le premier type de lumière (Figure 9).

En complément des analyses précédentes, le degré d'affinité (c'est-à-dire attraction / répulsion) de l'espèce par rapport aux différents types de lampes a été évalué. À partir de cette analyse, 24 espèces ont été détectées avec une association significative par rapport aux lampes VM (N = 11), HMC (N = 12) et LED blanches (N = 1). Sur la figure 11, les espèces et le degré d'attraction / répulsion envers les différents types de lumière sont représentés. Comme on peut le voir, ni VSAP ni PC-Amber n'ont exercé d'attraction sur les espèces considérées, à l'exception de *Macrothylacia rubi*, qui dans cette étude a montré une plus grande préférence (bien que non statistiquement significative) pour les lampes PC-Amber.

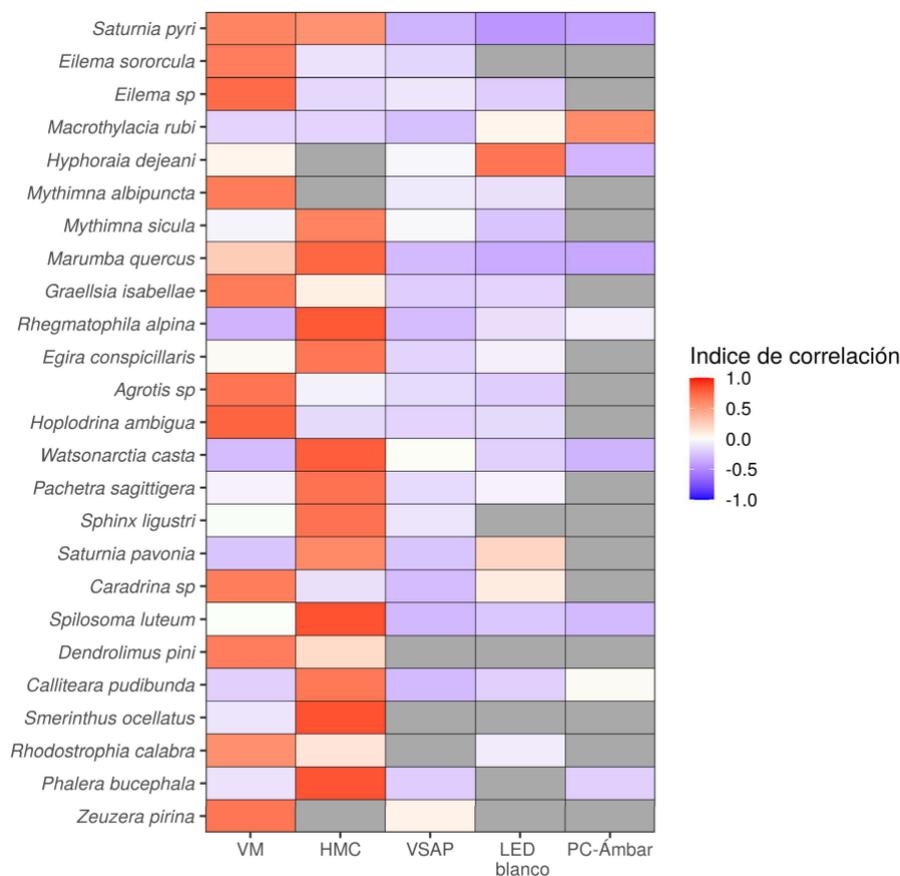


Figure 11. Tendance des espèces de macrolépidoptères à voler vers (valeurs positives) ou à éviter (valeurs négatives) les différents types de lampes. Seules les espèces avec une association significative présente dans plus de trois types de lampes et une association significative avec au moins l'un d'entre eux sont indiquées. En gris, les espèces qui n'ont pas été capturées dans les pièges d'un certain type de lampe.

Sscarabées

Au cours des prélèvements, plus de 300 spécimens de scarabées (*Coleoptera*) ont été capturés. Bien que cela n'ait pas été initialement envisagé, l'attraction que les différentes lampes exercent sur ce groupe a été analysée, car elle est abondante dans les captures.

Si l'on laisse de côté les nombreux spécimens non identifiés au niveau de l'espèce (~40% du total), la majorité des captures concernaient deux espèces de scarabées: *Amphimallon sp.* et *Melolontha melolontha*. Ces deux taxons ont été capturés dans presque toutes les localités échantillonnées et dans tous les types de lampes.

L'effet du type de lampe sur les prises de scarabées était significatif. Le nombre d'individus capturés dans les lampes HMC et VM était beaucoup plus élevé que celui enregistré dans les lampes VSAP et PC-Amber, mais pas par rapport à ceux enregistrés dans les lampes à LED blanches (Figure 12). La prédiction du modèle suggère une attraction 56 à 30 fois inférieure dans PC-Amber par rapport aux lampes HMC et VM, respectivement. Dans ce cas, l'effet du PC-Amber était également significativement plus faible que celui observé dans les lampadaires à LED blanches.

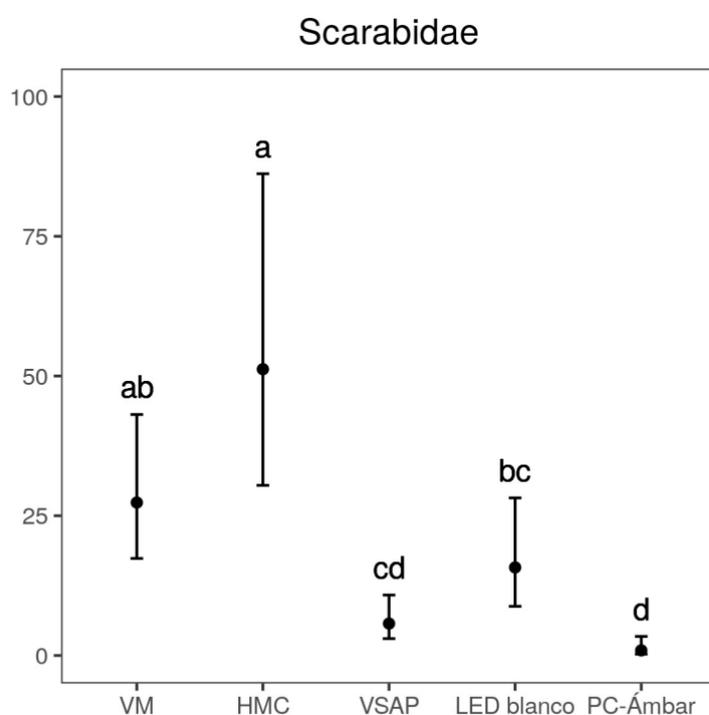


Figure 12. Prédiction de modèles mixtes linéaires généralisés ajustés sur le nombre d'espèces de scarabées capturées. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance (95%) de la prédiction et ont été transformées à l'échelle d'origine. Les paires de types de lampes avec des effets sensiblement différents ne partagent pas une lettre.

CONCLUSIONS

Les insectes représentent une fraction importante de la biodiversité et sont vitaux pour le fonctionnement et la bonne santé des écosystèmes. Ce sont des maillons fondamentaux des processus écologiques tels que la pollinisation, le cycle des nutriments ou les chaînes trophiques. Plus de 50% des insectes sont nocturnes et dépendent donc des conditions d'obscurité et de lumière naturelle (lune et étoiles) pour mener à bien leurs fonctions vitales. En ce sens, la lumière artificielle (ALAN) affecte négativement leurs cycles de vie et leur survie. Les macrolépidoptera, principaux insectes pollinisateurs nocturnes, sont particulièrement attirés par les sources de lumière artificielle. Les populations de ces espèces connaissent un déclin significatif dans plusieurs pays européens et des études récentes trouvent que la pollution lumineuse croissante est l'une des causes de ce déclin (Grubisic, et al., 2018).

En Europe, certaines espèces de macrolépidoptères en situation de rareté ou défavorable comme *G. isabellae* sont incluses dans des listes de référence, comme la Directive 92/43/CEE, également connue sous le nom de Directive Habitat. Pour ces espèces considérées d'intérêt communautaire, la désignation de lieux pour leur protection, ainsi que la mise en place de mesures de conservation spécifiques, sont obligatoires.

Cette étude a analysé le niveau d'attraction exercé par les principaux types de lampes utilisées dans l'éclairage public des villes des Pyrénées occidentales (Navarre) sur les macrolépidoptères nocturnes. Le modèle statistique qui en résulte a révélé que **différents types de lampes ont un effet d'attraction significatif sur les macrolépidoptères nocturnes**. Pour les espèces cataloguées, **l'effet d'attraction était également significatif pour *G. isabellae***, soulignant l'importance de l'éclairage public dans la conservation de l'espèce.

De toutes les perspectives étudiées, il a été démontré que **les lampes à vapeur de mercure (VM) ont le plus grand impact sur les macrolépidoptères nocturnes**. Ce type de lampe, avec plusieurs pics d'émission dans les gammes UV, bleu et vert, est plus attractif pour le groupe d'individus et pour la plupart des familles de papillons étudiés. De plus, les lampes VM exercent une attraction importante sur la seule espèce cataloguée capturée dans cette étude: *G. isabellae*. **Les lampes aux halogénures métalliques céramiques (HMC) ont un impact similaire aux lampes VM**.

Il a été démontré que les lampes VSAP affectent beaucoup moins d'individus de moins

d'espèces de macrolépidoptères que les lampes VM et HMC. Cependant, il est également devenu clair que la lumière des lampes VSAP affecte *G. isabellae*.

Actuellement, il y a une tendance à remplacer les lampes conventionnelles par la technologie LED blanche, plus économique et efficace. Cependant, les résultats de la présente étude suggèrent que **l'installation de LED blanches ne pourrait PAS réduire significativement l'impact potentiel sur les lépidoptères et en particulier sur *G. isabellae***. Les LED blanches montrent une grande variabilité dans leur attraction (larges intervalles de confiance), de sorte que, dans certains contextes, elles pourraient avoir un impact disproportionné sur les lépidoptères nocturnes.

Concernant les lampes à LED PC-Ambre, **cette étude constitue la première évaluation empirique de leur affection sur les insectes nocturnes** dont nous avons des nouvelles. Ces lampes sont une source lumineuse avec pratiquement aucune émission à ondes courtes. Pour cette raison, un impact moindre sur la faune nocturne est supposé. Les résultats obtenus dans cette étude appuient la prédiction sans équivoque. De plus, contrairement aux lampes LED blanches et VSAP, **aucune capture de *G. isabellae* n'a été documentée dans les LED PC-Ambre**. Il convient de noter ce résultat, d'autant plus que les pièges des lampadaires avec PC-Ambre étaient situés dans une zone à densité particulièrement élevée de l'espèce.

Les résultats de cette étude pourraient être largement généralisables au groupe des insectes volants nocturnes, comme cela a été vérifié dans le cas des scarabées. Des études récentes (Boyes et al., 2020) ont montré qu'il existe une forte corrélation entre les captures de papillons de nuit et le reste des insectes nocturnes (du moins ceux avec phototaxie).

RECOMMANDATIONS POUR LA GESTION DE L'ÉCLAIRAGE

L'étude sur laquelle se fonde ce document démontre les différents attraits qu'ont les types de lampes sur les lépidoptères nocturnes des Pyrénées occidentales, en Navarre. **Cette étude démontre la nécessité de considérer ALAN comme une menace générale pour l'environnement.** Pour cette raison, les actions dans le domaine de l'éclairage doivent prendre en compte les résultats obtenus.

De plus, une simple inspection visuelle nocturne de la zone montre qu'il n'y a pas de prise de conscience claire de l'effet de la pollution lumineuse sur les écosystèmes. On voit des installations inutiles, des actions de rénovation d'éclairage inadéquates, des luminaires qui contrastent fortement avec des installations bien exécutées, un éclairage ancien et inefficace, etc. Tout cela renforce la nécessité d'une **campagne de sensibilisation générale** qui met en évidence la richesse de l'environnement nocturne et l'importance de préserver l'obscurité naturelle de la nuit. Cette information doit atteindre **la population** de ces vallées, mais aussi **les entreprises** qui y sont implantées, **les administrations locales** (avec compétence dans l'éclairage des villes) et **le Gouvernement de Navarre**, chargé des routes et des campagnes d'aides à la rénovation de l'éclairage public.

D'un point de vue appliqué, les résultats de cette étude appellent au **remplacement des lampes traditionnelles encore existantes aujourd'hui dans les Pyrénées occidentales par de nouveaux luminaires équipés de lampes LED PC-Amber**. La priorité la plus élevée devrait être de remplacer les lampes VM suivies par les HMC.

D'autres aspects à considérer lors de la priorisation de la rénovation de l'éclairage, non abordés dans cette étude, mais pour lesquels les preuves scientifiques sont abondantes, sont la proximité des lampadaires avec les habitats naturels, leur disposition par rapport aux autres lampadaires (amplification de l'effet par accumulation) et / ou création de barrières linéaires. Une fois les types de lampes identifiés, ces aspects doivent également être pris en compte lors de la définition des actions au sein de chaque ville si les ressources ne permettent qu'un remplacement partiel ou spécifique de l'éclairage.



Figure 13. Éclairage LED PC-Ambar à Vidangoz / Bidangotze (Vallée de Roncal). La lumière de ces lampes est celle qui affecte le moins les insectes nocturnes.

Les résultats de la présente étude suggèrent que **les lampes LED PC-Amber, d'efficacité similaire aux LED blanches, sont actuellement la meilleure alternative.** En plus de contribuer à la protection du paysage nocturne et à la qualité du ciel étoilé, **la conversion de l'éclairage des zones rurales en LED PC-Ambre est considérée comme la meilleure option pour minimiser l'impact d'ALAN sur, au moins, le insectes volants nocturnes des Pyrénées.**

Les niveaux d'affection des différentes lampes vis-à-vis des macrolépidoptères en général, et de *G. isabellae* en particulier, indiquent la nécessité de caractériser l'éclairage de l'ensemble de la zone. Il est nécessaire d'identifier les sources de lumière les plus défavorables et d'établir une **feuille de route pour le renouvellement de l'éclairage**, en établissant des priorités pour remplacer les lampes les plus attrayantes par d'autres à faible effet sur *G. isabellae*.



Figure 14. Luminaires de type villa avec lampes VM à Izal (Valle de Salazar). Ces lampes sont celles qui affectent le plus les lépidoptères nocturnes et leur remplacement par des LED PC-Amber devrait être une priorité.



Figure 15. Ville d'Ibilcieta / Ibiltzieta photographiée depuis l'autoroute NA-178 qui traverse la vallée de Salazar. Les luminaires à LED blanc chaud peuvent avoir un impact majeur sur l'attraction des insectes volants nocturnes. La présente étude montre que le meilleur choix dans ces localités est la LED PC-Amber.



Figure 16. Éclairage extérieur de la fromagerie ENAQUESA à Roncal (Vallée de Roncal). Ils éblouissent les conducteurs sur l'autoroute de la vallée.



Figure 17. Les lumières extérieures de l'ENAQUESA projettent leur lumière à proximité de la rivière Eska et des forêts de pins voisines, habitat de *G. isabellae*. Photographies prises le samedi 20 février 2021 à 22h00, à une heure sans activité extérieure à l'usine.



Figure 18. Éclairage du rond-point où convergent les routes NA-137 et NA-214 près de Burgui (vallée de Roncal). Dans un lieu avec tant de biodiversité et si peu de trafic nocturne, on se demande pourquoi des installations comme celle-ci sont construites. De plus, des lampes à LED blanc froid ont été choisies, qui pourraient être aussi nocives pour les insectes que les lampes VM. Ces types d'installations, s'ils sont vraiment nécessaires, devraient être équipés de systèmes de détection des véhicules qui activent les lampes à l'approche et les éteignent à la sortie.



Figure 19. Entrée de la ville de Navascués par le port de Las Coronas. Dans les lieux où la conservation des habitats et des espèces revêt une importance particulière, il est nécessaire d'envisager la rénovation de l'éclairage avec des critères différents de ceux des grandes villes. Les LED blanches qui remplacent les lampes VSAP traditionnelles peuvent avoir un effet néfaste sur l'environnement, augmentant le stress qu'elles exercent sur de nombreuses espèces.