

Étude par l'acoustique de l'effet de la lumière artificielle et de l'occupation du sol sur la biodiversité en période nocturne dans le Parc Naturel Régional des Baronnies provençales



Réalisé par Adrien CHARBONNEAU, encadré par Amandine GASC (IMBE) et Thierry TATONI (IMBE) à l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE) en collaboration avec le Parc Naturel Régional des Baronnies provençales

Master 2 - Biodiversité Écologie Évolution

Finalité Gestion Adaptative de la Biodiversité

Année 2019-2020

Mémoire de stage de Master 2 Biodiversité, Écologie et Évolution (BEE) finalité Gestion
Adaptative de la Biodiversité (GABi)

Étude par l'acoustique de l'effet de la lumière artificielle et de l'occupation du sol sur la biodiversité en période nocturne dans le Parc Naturel Régional des Baronnies provençales

Réalisé par Adrien CHARBONNEAU, encadré par Amandine GASC (IMBE) et Thierry
TATONI (IMBE) à l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et
continentale (IMBE) en collaboration avec le Parc Naturel Régional des Baronnies
provençales

Master 2 - Biodiversité Écologie Évolution

Finalité Gestion Adaptative de la Biodiversité

Année 2019-2020

Responsables pédagogiques : Alexandre MILLON et Agathe LERICHE

Charte relative à la lutte contre le plagiat de d'Aix Marseille Université

Approuvée par le Conseil des Études et de la Vie Universitaire de l'Université d'Aix-Marseille en date du 4 octobre 2012,

Approuvée par le Conseil Scientifique de l'Université d'Aix-Marseille en date du 16 octobre 2012,

Approuvée par le Conseil d'Administration de l'Université d'Aix-Marseille en date du 27 novembre 2012.

Préambule

Afin de garantir la qualité des diplômes délivrés à ses usagers, l'originalité des publications pédagogiques et scientifiques de ses personnels enseignants et/ou chercheurs, et faire respecter les droits de propriété intellectuelle des auteurs, l'Université d'Aix-Marseille est engagée dans la lutte contre le plagiat. Les travaux réalisés par les usagers et par les personnels de l'Université doivent répondre à l'ambition de produire un savoir inédit et d'offrir une lecture nouvelle et personnelle d'un sujet.

Les travaux concernés par cette obligation sont notamment : les thèses, les mémoires, les articles, les supports de cours, sans que cette liste soit exhaustive.

Article 1

Le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou les idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité

Tout plagiat, quel qu'en soit le support, constitue une faute. Le plagiat constitue à la fois la violation la plus grave de l'éthique universitaire et un acte de contrefaçon. C'est un délit au sens de l'article L 335-2 du code de la propriété intellectuelle. En outre, le fait de commettre un plagiat dans un document destiné à être publié constitue une circonstance aggravante.

Article 2

Les usagers et les personnels de l'Université ne doivent pas commettre de plagiat dans leurs travaux.

Article 3

Les reproductions de courts extraits de travaux préexistants en vue d'illustration ou à des fins didactiques sont admises sans nécessité de demander le consentement de l'auteur, uniquement dans le strict respect de l'exception de courte citation.

Dans ce cadre, les usagers et les personnels de l'Université s'engagent, lorsqu'ils reproduisent de courts extraits de tels travaux, à identifier clairement qu'il s'agit d'un emprunt, en apposant des guillemets, et en indiquant le nom de l'auteur et la source de l'extrait.

Article 4

L'Université d'Aix-Marseille est attachée au respect des droits de propriété intellectuelle et se réserve la possibilité de rechercher les tentatives de plagiat, notamment par l'utilisation d'un logiciel adapté.

Article 5

Les cas présumés de plagiat feront l'objet de poursuites engagées par l'Université devant les instances compétentes, et leurs auteurs seront passibles de sanctions disciplinaires.

Ces violations des droits de propriété intellectuelle pourront également donner lieu à des poursuites judiciaires.

Je, soussigné, **Adrien CHARBONNEAU** certifie avoir pris connaissance de la présente charte et l'avoir respectée.

Fait à Marseille le 19/08/2020

Signature :



REMERCIEMENTS

Les conditions de déroulement des stages ont été mises à rude épreuve cette année et je remercie toutes les personnes qui ont pu m'accompagner et me conseiller malgré les priorités auxquelles elles faisaient face. Je remercie le Parc Naturel Régional des Baronnies provençales et son équipe, pour l'accueil et pour m'avoir permis de réaliser ce stage.

Mes remerciements vont à Amandine Gasc qui a su m'accompagner tout au long du stage et sans la moindre faille ! Grâce à son expérience et à ses capacités pour combiner recherche scientifique et travail de terrain, nous avons pu éviter de nombreux écueils et anticiper beaucoup de travail. Elle m'a fait découvrir le vaste monde de l'éco-acoustique et je suis fier d'y avoir participé à mon échelle. Ce fut une expérience inoubliable et je l'en remercie mille fois.

Merci à Thierry Tatoni et à Aurélie Carod pour leur soutien tout au long du stage, leur accompagnement et pour leur très bonne connaissance du territoire des Baronnies.

Merci à Samuel Challéat pour ses conseils avisés durant l'étude, pour son prêt d'enregistreurs acoustiques ainsi que pour son superbe livre « Sauver la nuit » (Challéat, 2019) que toute personne devrait avoir lu !

Je remercie aussi les mairies, maires et propriétaires ayant participé à cette étude qui, malgré leurs problématiques bien différentes des miennes au moment de mes appels, m'ont accordé un peu de temps pour discuter. Je tiens à remercier en particulier la mairie de Val-Buëch Méouge, son maire Gérard Nicolas et son premier adjoint : Vincent Jacquemart qui ont été très motivés par cette étude et nous ont fournis un logement.

Enfin, je remercie Jessica Giraldi pour ses sages relectures et son infailible soutien au quotidien, ainsi que David Chambonnet pour ses nombreux conseils de correction.

Et bien entendu, merci à toutes les personnes qui ont participé à ce stage, de près ou de loin !

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	- 1 -
2. MATÉRIEL ET MÉTHODE	- 5 -
2.1. Sélection des sites d'échantillonnage	- 5 -
2.1.1 Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)	- 6 -
2.1.2 Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)	- 8 -
2.2. Données de lumière artificielle	- 9 -
2.3. Collection des enregistrements sonores	- 10 -
2.3.1 Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)	- 10 -
2.3.2 Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)	- 10 -
2.4. Mesures acoustiques : indices de diversité acoustique et identification par l'écoute	- 11 -
2.4.1. Indices de diversité acoustique	- 11 -
2.4.2. Identification de la faune par l'écoute	- 12 -
2.5. Indices paysagers	- 13 -
2.6. Analyses statistiques	- 14 -
3. RÉSULTATS	- 15 -
3.1. Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)	- 15 -
3.1.1. Description des données obtenues	- 15 -
3.1.2. Description des indices acoustiques	- 16 -
3.1.3. Modélisation des indices acoustiques	- 18 -
3.1.4. Tests statistiques des indices acoustiques	- 19 -
3.1.5. Modélisation à partir des identifications acoustiques	- 20 -
3.2. Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)	- 21 -
3.2.1. Description des données obtenues	- 21 -
3.2.2. Description des indices acoustiques	- 21 -
3.2.3. Modélisation des indices acoustiques	- 22 -
4. DISCUSSION	- 23 -
4.1. Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)	- 23 -
4.2. Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)	- 27 -
4.3. Conclusion sur les deux protocoles	- 28 -
5. CONCLUSION	- 28 -
BIBLIOGRAPHIE	- 29 -

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du site d'étude et position des villages sélectionnés pour le protocole 1	- 6 -
Figure 2 : Exemple de localisation des enregistreurs au sein de la commune de Sahune (26)- 7 -	-
Figure 3 : Localisation du site d'étude et positions des sites d'échantillonnages pour le protocole 2	- 9 -
Figure 4 : Exemple de sonogramme permettant l'identification des sons. Chaque rectangle (et accolade) rouge représente un contact. Enregistrement effectué le 16 juin 2020 à 21h00 sur la commune de Reilhanette (26).	- 13 -
Figure 5 : Nombre de contacts émis par chaque type de source d'émission	- 16 -
Figure 6 : Représentation de l'indice acoustique BIOAC en fonction des heures de la nuit et des facteurs des variables de distance et d'extinction du village.	- 17 -
Figure 7 : Sonogrammes de trois séquences d'enregistrements représentant le changement d'activité acoustique en fonction des différentes heures de la nuit. Enregistrements effectués sur les communes de Reilhanette (26) le 16 juin 2020, Orpierre (05) le 23 juin 2020 et Curnier (26) le 13 juin 2020.	- 17 -
Figure 8 : Représentation de l'évolution des quatre indices acoustiques sélectionnés durant les heures de la nuit.	- 21 -
Figure 9 : Évolution du nombre de contacts par espèce selon les heures de la nuit.....	- 24 -

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeur de la statistique p de la comparaison des moyennes des facteurs des variables extinction et distance au village.	- 19 -
Tableau 2 : Valeur de la statistique p de la comparaison des moyennes des facteurs des variables extinction et distance au village.	- 20 -

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Liste des communes sélectionnées pour le protocole 1	- 35 -
Annexe II : Représentation des indices acoustiques en fonction des heures de la nuit et des facteurs des variables de distance et d'extinction du village.....	- 36 -
Annexe III : Photographie des deux types d'enregistreurs utilisés pour l'étude.....	- 37 -

Pour aider à la compréhension et au confort du lecteur, la totalité des figures, tableaux et annexes ont été affichés en haute qualité sur le site internet de l'auteur du présent document :
<http://adrien.charbonneau.free.fr/PRO/STAGE/ALAN/>

1. INTRODUCTION

La lumière artificielle est une énergie importante pour la vie humaine. Elle est nécessaire pour prolonger l'activité journalière (Hölker, Moss, *et al.*, 2010) mais peut également représenter une menace. En effet, de nombreux effets négatifs sont associés aujourd'hui à l'expansion de la lumière artificielle, appelée pollution lumineuse (Longcore et Rich, 2004). Ce concept de pollution lumineuse liée à la lumière artificielle est apparu à la fin du XIX^{ème} siècle (Kumlien, 1888). Par définition, la pollution lumineuse affecte négativement le comportement ou la physiologie d'une ou plusieurs espèces (Pauwels, 2018). Plus tard, au XX^{ème} siècle, plusieurs études médicales se sont penchées sur cette question (Hölker, Moss, *et al.*, 2010). Avec l'accroissement de la population humaine, et la corrélation entre la pollution lumineuse et le développement de l'industrie, la dispersion de la lumière artificielle la nuit s'accroît. Le principal effet chez l'être humain est la perturbation de la sécrétion de la mélatonine. En effet, cette dernière est sécrétée en l'absence de lumière et elle intervient dans la régulation des rythmes circadiens et saisonniers chez les mammifères. De plus, de nombreux rôles lui sont attribués au niveau endocrinien, métabolique, immunitaire et enfin au niveau du comportement. (Coogan et Wyse, 2008 ; Shuboni et Yan, 2010 ; Le Tallec *et al.*, 2013). Ainsi, la pollution lumineuse va perturber, voire inhiber la sécrétion de cette hormone, ce qui va déséquilibrer l'horloge circadienne et la pression du sommeil. Cela aura pour conséquence une chute de performance de l'individu et des perturbations de son métabolisme pouvant entraîner des conséquences sur sa santé (dépression et augmentation du risque de diabète). (Shuboni et Yan, 2010 ; Le Tallec *et al.*, 2013).

Par la suite, les naturalistes ont également fait le constat de l'apparition d'effets négatifs pour la faune et la flore dus à la pollution lumineuse (Kumlien, 1888 ; Rich et Longcore, 2006 ; Hölker, Moss, *et al.*, 2010). L'ensemble des taxons faunistiques de la planète sont impactés par la pollution lumineuse (Siblet, 2008). Les conséquences sur le métabolisme des humains sont valables sur la majorité des mammifères (Dimovski et Robert, 2018). Cette lumière artificielle a des effets importants au niveau des comportements (Rich et Longcore, 2006 ; Stracey *et al.*, 2014). L'effet de la pollution lumineuse est particulièrement visible lors du processus de prédation. Par exemple, il y a une forte diminution des petits mammifères aux abords des villes fortement éclairées : ces derniers étant particulièrement exposés au risque de prédation, ils fuient les lieux illuminés (Longcore et Rich, 2004). Un autre effet majeur de la lumière est l'impact négatif sur la compétition pour la reproduction. Plusieurs études ont montré que pour les oiseaux, la compétition par le chant est une étape primordiale dans la recherche de

partenaires. Dès le début du jour, les chanteurs se positionnent et vocalisent un maximum. Dans les sites éclairés la nuit, les chanteurs vont commencer à chanter plus tôt et sans que le jour ne soit levé (Malher et Magne, 2010 ; Da Silva *et al.*, 2015). Ce changement de comportement est important et se révèle être un impact majeur de la pollution lumineuse. En plus de cela, l'effet de la pollution lumineuse n'affecte pas seulement les oiseaux chanteurs le matin. En effet, ces derniers, en chantant plus tôt, vont perturber tout un écosystème acoustique très équilibré en temps normal (Slabbekoorn et den Boer-Visser, 2006). La lumière artificielle, en impactant les êtres vivants par des modifications physiologiques, de comportement et d'interaction, va en définitive impacter, bien qu'indirectement, l'espace sonore d'un milieu. Alors que les effets négatifs de la pollution lumineuse sont avérés, le besoin en lumière artificielle demeure croissant. En effet, la population humaine est en perpétuelle expansion, ce qui implique que la pollution lumineuse s'accroît et évolue de plus en plus, en corrélation avec la croissance de la population (Falchi *et al.*, 2016).

Cette croissance démographique, corrélée avec l'augmentation de l'espérance de vie, entraîne une hausse de la consommation dans le monde (Kates, 2000). Cela nécessite donc une augmentation de l'utilisation de la lumière artificielle (Mellander *et al.*, 2015). De plus, les populations humaines tendent à se regrouper en des pôles urbains où il existe ainsi de fortes densités de population (United Nations *et al.*, 2019). De ce fait, les activités nocturnes augmentent : il faut donc éclairer, pour les activités humaines mais également pour la sécurité des habitants (Fotios *et al.*, 2015). Un lieu éclairé sera ainsi moins soumis aux risques d'accidents corporels ou matériels, aux dégradations volontaires et aux risques d'agressions qu'un lieu entièrement sombre (Peden et World Health Organization, 2004 ; Chalfin *et al.*, 2019). En suivant ce principe de la nécessité d'éclairer pour répondre à diverses attentes, de nombreuses villes se sont équipées d'installations d'émission de lumière artificielle permettant de diffuser une lumière de manière intense et dans la majorité des directions (Sordello *et al.*, 2018). Cependant, cette augmentation de l'éclairage des villes et cette diffusion que l'on pourrait considérer comme "sans limite" a un coût : celui de la production de l'électricité, mais aussi le coût de la disparition de la nuit noire. Cette disparition est, quant à elle, bien moins perceptible et surtout mal considérée par les usagers (Challéat, 2019).

La disparition du ciel nocturne impacte la majorité de la planète et en particulier les pays développés. C'est dans ce contexte que l'Association Internationale Dark Sky (International Dark-Sky Association, IDA) a instauré l'idée de développer des réserves dans le monde, les

Réserves Internationales de Ciel Étoilé (RICE), dans le but de préserver des lieux des effets néfastes de la pollution lumineuse (International Dark-Sky Association, 2020). Cette même mission a également été mise en place en France par l'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes en créant un label nommé "Villes et villages étoilés" (ANPCEN, 2020). De plus, de nombreuses communes en France ont pris la décision de limiter l'éclairage nocturne dans le but de réduire le coût de la dépense énergétique associée à l'éclairage urbain (Nuit-France, 2020). La consommation d'électricité est, pour certaines communes, la première dépense financière (comm. pers. 1). Cependant, il s'agit d'une décision complexe à prendre car il y est associé de nombreux enjeux, comme par exemple la sécurité des biens et des personnes ou encore l'attractivité touristique. Afin de répondre à ces enjeux, des solutions alternatives sont parfois mises en place. Par exemple, le dispositif de LED (Light Emitting Diode) est maintenant de plus en plus utilisé car il s'agit d'une solution peu coûteuse du fait de sa faible consommation d'énergie (Kyba *et al.*, 2017). Cette adoption rapide des LED a cependant, selon Kyba *et al.*, 2017, augmenté la quantité de lumière artificielle émise pendant la nuit ainsi que son rayonnement et son étendue de 2% chaque année. Ainsi, cette utilisation de plus en plus fréquente des LED a favorisé la propagation d'une lumière possédant un pic de spectre à 400-450 nm ("lumière bleue") particulièrement nocive pour la plupart des êtres vivants (Musters *et al.*, 2009).

En France, les sites où la pollution lumineuse est absente sont de plus en plus rares (ANPCEN, 2020). C'est à partir de cette conclusion que de nombreux sites de protection de la biodiversité ont intégré cette menace à leur plan de gestion ou à leur charte (Challéat, 2019). En particulier, les Parcs Naturels Régionaux comptent parmi les lieux de réconciliation entre la biodiversité et la population humaine, et sont aujourd'hui des sites où cette pollution lumineuse devient une question de premier ordre (Challéat *et al.*, 2018 ; Challéat, 2019). Le Parc Naturel Régional des Baronnies provençales est l'un des sites les mieux préservés en France à travers de nombreux aspects et notamment la faible pollution lumineuse présente (Association AVEX, 2016 ; Parc Naturel Régional des Baronnies provençales, 2015). Il est situé dans une zone peu exposée à la pollution lumineuse du territoire français, car il est géographiquement isolé des gros pôles urbains. Il a été créé en 2015, et est présent dans deux régions : en Auvergne-Rhône-Alpes, dans le département de la Drôme (26), et dans la région Sud, dans le département des Hautes-Alpes (05). Les patrimoines et l'environnement nocturnes ont été inscrits dans la charte du Parc comme enjeux d'actions (Parc Naturel Régional des Baronnies provençales, 2015). La faible pollution lumineuse présente dans ce site peut s'expliquer par la faible densité de

population du Parc, comprise en moyenne entre 10 et 40 habitants au km². Cette faible pollution lumineuse, entre autres critères, en fait un candidat potentiel pour devenir une Réserve Internationale de Ciel Étoilé (International Dark-Sky Association, 2020). De plus, il est estimé dans le Parc Naturel des Baronnies, que la moitié des communes coupent leurs installations d'éclairage artificiel la nuit (entre 23h00 et minuit), avec un redémarrage entre 05h00 et 06h00 (comm. pers. 2 ; ANPCEN, 2020). Les raisons sont diverses, majoritairement économiques, mais la question de l'impact sur la biodiversité est soulevée. Le Parc des Baronnies est également reconnu comme un site possédant une grande biodiversité (Parc Naturel Régional des Baronnies provençales, 2015). Cela est la conséquence de la présence de milieux à la fois méditerranéens et montagnards voire préalpins. Cette mosaïque d'habitats crée des écosystèmes exceptionnels et d'une richesse taxonomique étonnante. Ce Parc est donc un lieu privilégié pour étudier les effets de la pollution lumineuse sur la biodiversité en période nocturne.

L'éco-acoustique est l'une des approches les plus intéressantes et originales pour évaluer ces paramètres (Sueur et Farina, 2015 ; Gasc *et al.*, 2017). En effet, en période nocturne, la majorité des espèces communiquent par le son (Hölker, Wolter, *et al.*, 2010 ; Chen et Wiens, 2020). Malgré une acuité visuelle très souvent élevée du fait de leur vie nocturne, le son est un moyen fiable de communiquer sans forcément être visibles et d'appliquer une présence sur un territoire complètement obscur (La, 2012). L'éco-acoustique consiste à placer sur le terrain des enregistreurs programmables afin d'enregistrer régulièrement les environnements sonores (Towsey *et al.*, 2014). En plus de pouvoir capter la majorité des sons dans son rayon d'action, l'éco-acoustique va permettre une étude passive sans aucune perturbation de l'écosystème et du paysage sonore, constituant ainsi un avantage non négligeable (Sueur et Farina, 2015). Cette biophonie, soit l'ensemble des sons émis par les êtres vivants d'un écosystème à l'exception des êtres humains (Krause, 2008 ; Pijanowski *et al.*, 2011), est mesurée par le biais d'indices acoustiques appliqués sur des enregistrements d'ambiances sonores (Sueur, Pavoine, *et al.*, 2008 ; Sueur *et al.*, 2014). Néanmoins, il est très difficile de comparer des enregistrements entre plusieurs habitats. En effet ces derniers étant très différents, leurs cortèges d'espèces associées sont différents, les comparaisons entre habitats sont donc complexes (Slabbekoorn et Smith, 2002). Cette étude est ainsi menée afin d'étudier les impacts de la pollution lumineuse associée à la structure paysagère sur la biodiversité en période nocturne. De plus, au niveau acoustique, l'habitat a un effet physique sur la propagation du son. En effet, le son ne se propagera pas de la même manière en forêt, en milieu ouvert, ou dans une haie. L'habitat va filtrer les sons selon sa densité et sa structure (Boncoraglio et Saino, 2007). Deux questions peuvent donc être émises

: (1) la lumière artificielle des villages du Parc Naturel Régional des Baronnies provençales impacte-t-elle la biodiversité la nuit ? Ici, cette question a de multiples enjeux : en plus des économies de dépenses liées à l'électricité, la démonstration de l'intérêt écologique de l'extinction nocturne pourrait encourager les bonnes pratiques pour la réduction de la pollution lumineuse. La seconde question est : (2) est-ce que les effets potentiels de la lumière artificielle peuvent être influencés par l'hétérogénéité des paysages du Parc des Baronnies ?

Les hypothèses de l'étude sont : (1) la lumière artificielle a un impact sur la biodiversité en période nocturne : l'augmentation de l'exposition à l'éclairage diminue la diversité acoustique des communautés présentes, et (2) les paysages présents accentuent les effets de la lumière artificielle : pour une même émission de lumière, une occupation du sol considérée comme homogène diminue la biodiversité contrairement à un paysage hétérogène.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Deux protocoles ont été mis en œuvre afin de répondre aux deux questions. Le premier permet de répondre à la question concernant l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité. Le second prend en compte une potentielle interaction entre cette pollution lumineuse et la structure du paysage afin de répondre à la question concernant l'effet de ce paysage, associé à la pollution lumineuse, sur la biodiversité.

2.1. Sélection des sites d'échantillonnage

Il faut tout d'abord préciser que la sélection finale des sites de dépôt des enregistreurs a été effectuée sur le terrain. En effet, il est nécessaire de les placer dans l'occupation du sol préalablement sélectionnée, à la distance préalablement sélectionnée, et en évitant la proximité des routes et rivières pour éviter les bruits parasites. Par exemple, les rivières produisent un bruit constant et il est très difficile de "nettoyer" les enregistrements pour analyse a posteriori.

Il est important de préciser également que l'ensemble des maires et des propriétaires ont été contactés au préalable afin de les informer de l'étude et de la pose des enregistreurs sur les sites. Ces discussions préalables ont donc, elles aussi, permis d'affiner la sélection des communes et des propriétaires du fait de l'accord ou le désaccord des maires et des propriétaires.

2.1.1 Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)

I. Sélection des communes

Les villages adhérents au Parc Naturel Régional des Baronnies provençales appliquent globalement deux types de politique d'éclairage : un éclairage toute la nuit ou un éclairage partiel, c'est-à-dire pendant une partie de la nuit avec un arrêt à partir de 23h00 ou 01h00 jusqu'à 05h00 ou 06h00 du matin. La sélection de villages potentiels à partir des 82 communes adhérentes a été réalisée avec le logiciel de cartographie QGIS (QGIS Team, 2020). Dans un objectif de comparabilité, les villages candidats pour l'étude ont été sélectionnés à partir des critères suivants : un nombre équivalent entre les modalités d'extinction ou non de l'éclairage, une densité d'habitants comparable (habitants/km²), une altitude et un type d'occupations du sol similaires autour de la commune, afin d'obtenir une homogénéisation des villages sélectionnés. Ces villages sont représentés dans la figure 1.

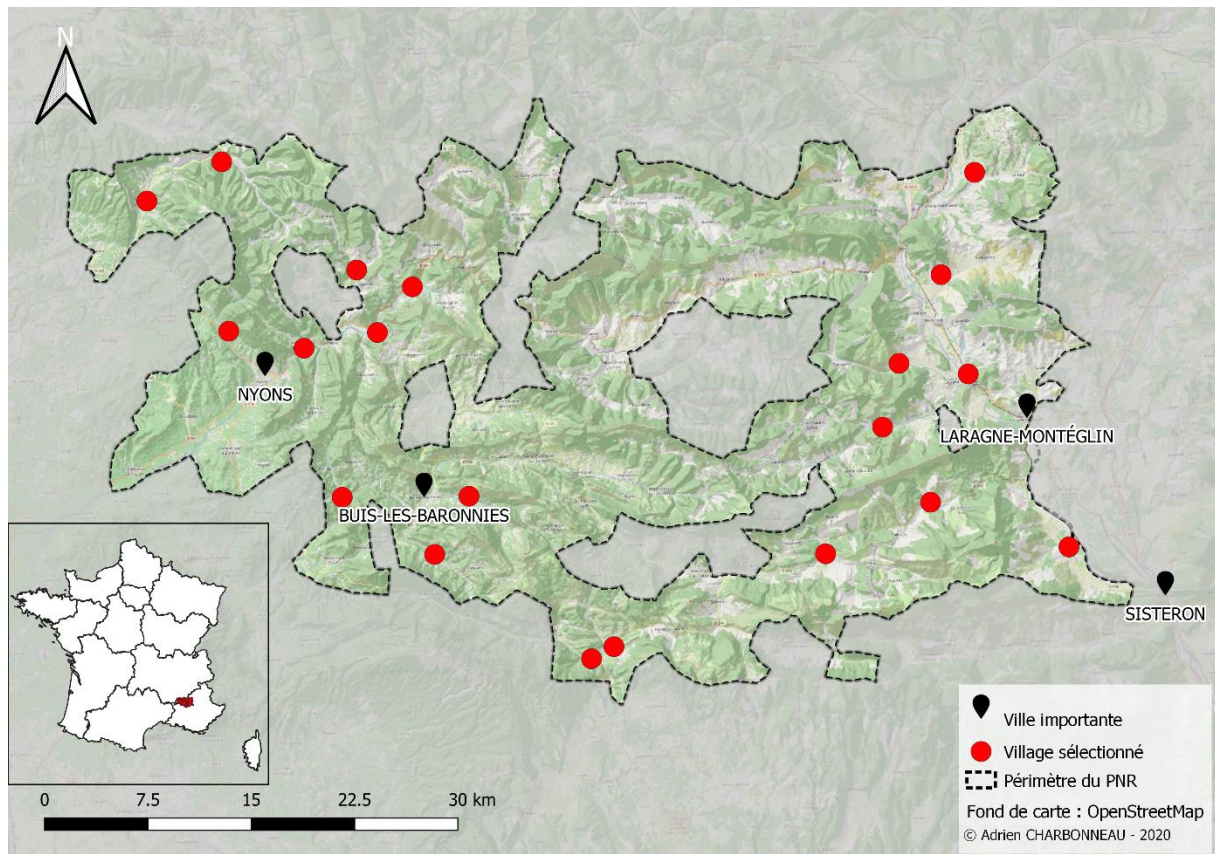


Figure 1 : Localisation du site d'étude et position des villages sélectionnés pour le protocole 1

Ainsi, il a été choisi une densité d'habitants comprise entre 10 et 40 habitant/km² qui correspond à la valeur moyenne des villages du Parc des Baronnies. La densité d'habitants est corrélée à la pollution lumineuse : plus une commune possède une densité de population importante, plus la pollution lumineuse l'est elle aussi (Operti *et al.*, 2018). Enfin, l'altitude du village peut avoir un effet sur le type de végétation et de faune présentes autour du village. Pour

tenter de réduire ce biais, les villages ont été sélectionnés entre 200m et 800m d'altitude. La liste complète des communes sélectionnées est disponible en annexe I.

II. Sélection des points d'échantillonnages au sein des communes

Avant de pouvoir sélectionner les sites d'échantillonnages autour des villages, une définition de la zone d'urbanisation a été nécessaire. La méthode est basée sur les données du 18 octobre 2019 du Plan Cadastral Informatisé Français (Ministère de l'économie et des finances, 2020). Ce dernier fournit les "lieux dits" des communes et, en particulier, les "villages", c'est-à-dire les zones centrales d'une commune où la majorité des habitants sont logés. Avec les lieux-dits "villages", deux périmètres à 200 et 600 m autour de ces pôles d'urbanisation ont été créés avec des zones tampon. Ces distances ont été définies à partir des capacités d'enregistrement du matériel utilisé qui a une portée de 100 à 200 m (donc 400m de diamètre). Un exemple de sélection de sites d'échantillonnages est représenté dans la figure 2.

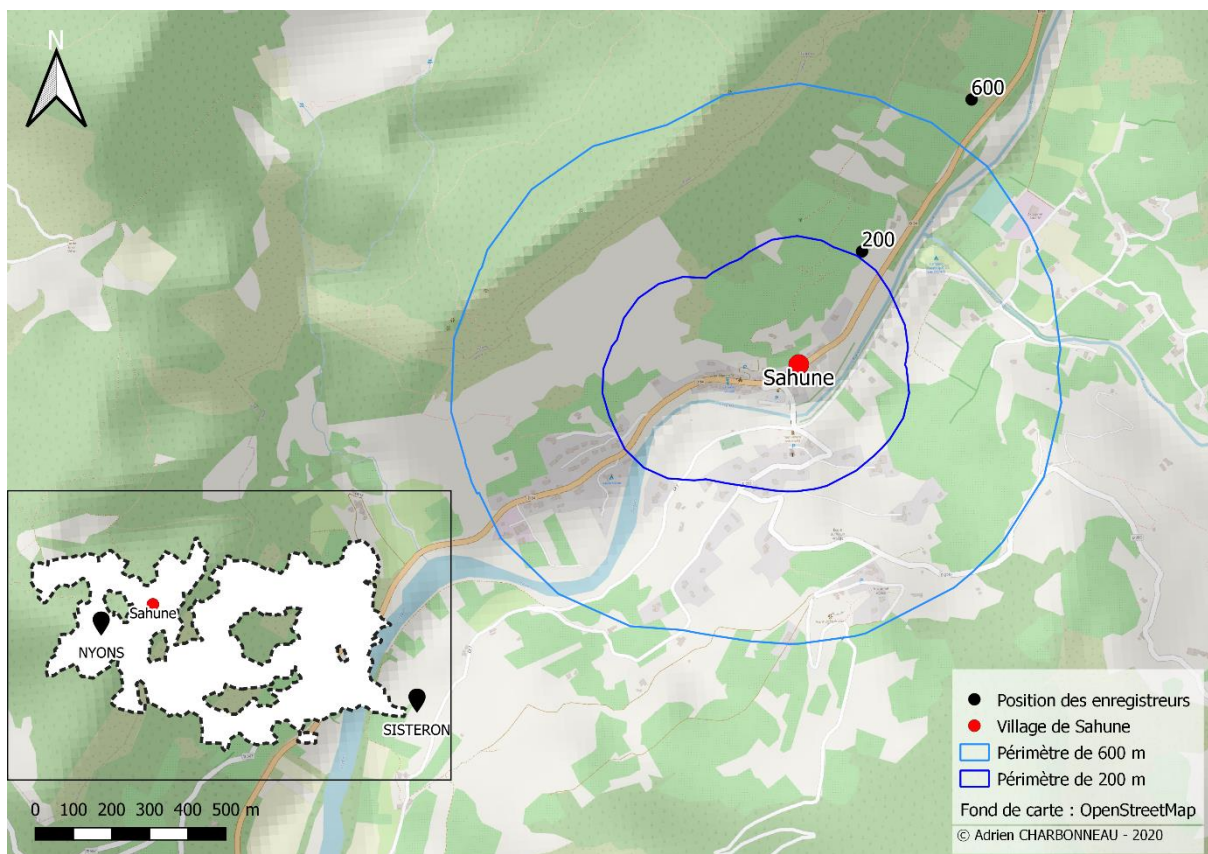


Figure 2 : Exemple de localisation des enregistreurs au sein de la commune de Sahune (26)

À l'intérieur de ces zones tampon, la couche "Corine Land Cover 2018" (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020) a été utilisée afin de déterminer les occupations du sol favorables à l'étude. En effet, des milieux ouverts ou fermés peuvent jouer sur la propagation du son et apporter un biais dans la détection des signaux par l'enregistreur (Boncoraglio et

Saino, 2007). Ces milieux doivent donc être à la fois : 1) présents sur une majorité des villages, 2) homogènes dans leur capacité à disperser le son, et la lumière, et 3) en représentation équilibrée dans les modalités comparées.

Les types d'occupation du sol de la classification Corine Land Cover 2018 sélectionnés sont les suivants :

- Code 22 - Cultures permanentes
- Code 23 - Prairies
- Code 24 - Zones agricoles hétérogènes
- Code 32 - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

Tous les sites d'échantillonnages ont été positionnés dans des habitats correspondant à l'un de ces quatre types.

Ce sont donc, pour finir, 40 sites qui ont été sélectionnés (deux sites par commune, et pour 20 communes réparties dans l'ensemble du Parc).

2.1.2 Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)

Pour cette seconde partie de l'étude, la commune de Val-Buëch Méouge a été sélectionnée. En effet, elle correspondait parfaitement aux attentes de l'étude du fait de sa taille, son environnement et l'importance de l'hétérogénéité des milieux présents. Dans cette commune, cinq points ont été positionnés aléatoirement dans chacune des catégories d'occupation du sol du niveau 3 de Corine Land Cover 2018 présentes sur la commune. Ce nombre est défini du fait du nombre d'enregistreurs disponibles initialement (40) et par rapport au nombre de classes d'occupations du sol présentes sur la commune. Ces positions ont ensuite été affinées en fonction de la propriété des parcelles concernées (terrain communal ou privé), ainsi que de l'accord des propriétaires et/ou de la mairie. Ce sont donc, pour finir, 32 sites qui ont été sélectionnés, ils sont représentés dans la figure 3.

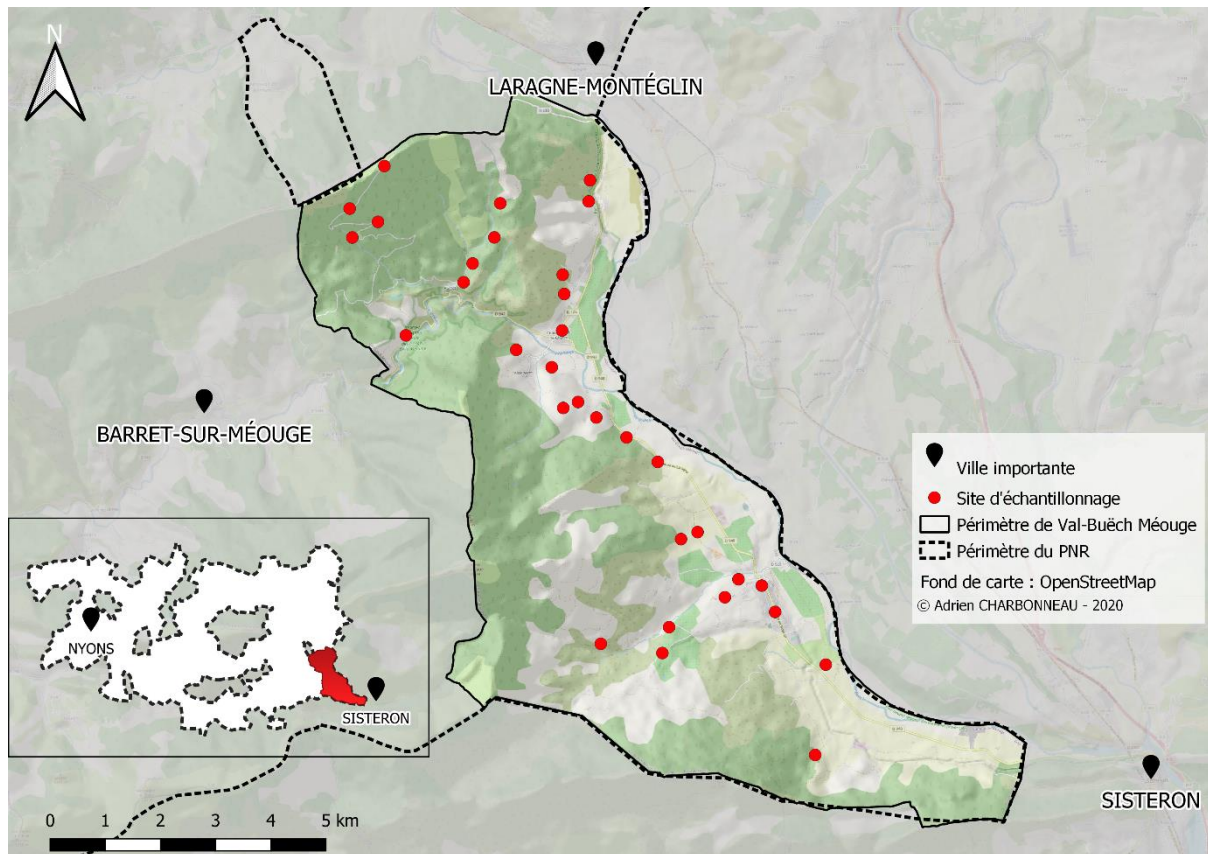


Figure 3 : Localisation du site d'étude et positions des sites d'échantillonnages pour le protocole 2

2.2. Données de lumière artificielle

Les données de lumière artificielle ont été obtenues auprès du laboratoire DarkSkyLab et de son directeur Sébastien Vauclair (DarkSkyLab, 2020). Il s'agit de données de "Night Sky Brightness" (NSB) appelée en français "luminance du fond de ciel" dont l'unité est en $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ (brillance du fond du ciel dans un carré d'une seconde d'arc de côté). Ainsi, plus cette valeur est élevée, plus la pollution par la lumière artificielle est faible. Il est estimé qu'une nuit parfaitement noire sans lune serait en moyenne de $21,6 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ (DarkSkyLab, 2020). Une valeur de NSB mesurée à moins de $19 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ environ serait considérée comme "de mauvaise qualité", et signifierait donc qu'il s'agit d'un ciel pollué par la lumière artificielle. Afin de modéliser la diffusion de la pollution lumineuse émise par un pôle urbain, en tenant compte des éléments paysagers aux alentours, le laboratoire utilise le logiciel Otus afin de prédire la pollution lumineuse sur n'importe quel site en France (DarkSkyLab, 2020). Pour corriger la diffusion de la pollution lumineuse, des données de radiance satellitaires sont utilisées. En effet, les satellites détectent la diffusion de la lumière sur la zone ciblée et permettent ainsi de corriger les modèles de diffusion. Dans le jeu de données utilisé pour cette étude, les données de radiance satellite utilisées sont celles du jeu de radiance composite 2015

VIIRS-DNB (The Earth Observations Group, 2020). Il ne s'agit donc pas d'un instantané pris à un instant donné, mais d'un composite réalisé à partir de nombreuses nuits claires au cours de l'année (comm. pers. 3).

2.3. Collection des enregistrements sonores

2.3.1 Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)

Les sites sélectionnés ont été équipés d'un enregistreur programmable de terrain SM4 (Song Meter Acoustic Recorder – WildlifeAcoustics – voir annexe III) pendant la période du 10 au 24 Juin 2020. Les enregistrements ont été réalisés avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz (48 000 échantillons par secondes correspondant à une fréquence maximale captée de 24 kHz), une amplification de +36dB, et un filtre "passe haut" qui laisse passer les hautes fréquences et atténue les fréquences inférieures à 220 Hz. Cela permet de se concentrer sur les sons d'origine naturelle. Les enregistrements ont été stockés en format WAVE (Waveform Audio File Format) avec une résolution de 16 bits.

Afin de couvrir l'intégralité de la nuit et comparer les modifications du paysage sonore avec la journée, un cycle d'enregistrement de 59 minutes et 1 minute de repos a été choisi. Chaque site a été échantillonné durant 4 jours et 4 nuits afin de pouvoir enregistrer plusieurs nuits de chaque site dans des conditions similaires optimales (sans pluie, sans vent, au sein d'une même saison). Les dates et heures ont ici été relevées en "heure locale d'hiver" (UTC+01) afin de standardiser les observations avec les autres collections acoustiques de l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE). Les heures représentées par la suite dans les graphiques sont toutes en "heure locale d'été" (UTC+02) correspondant à l'heure locale en France métropolitaine.

2.3.2 Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)

Les sites sélectionnés ont été équipés d'un enregistreur programmable de terrain de type AudioMoth (OpenAcousticDevices – voir annexe III) sur la période du 15 au 22 Juin 2020. Les enregistrements ont été réalisés avec une fréquence d'échantillonnage de 256 kHz (256 000 échantillons par seconde correspondant à une fréquence maximale captée de 128 kHz) et ils ont été stockés en format WAVE (Waveform Audio File Format) avec une résolution de 16 bits.

Cette fréquence d'échantillonnage permet au microphone d'enregistrer les chiroptères et orthoptères émettant des ultrasons.

Le cycle d'enregistrement est de 5 minutes et 10 minutes de repos, durant 6 nuits de 18h00 à 08h00 du matin afin de pouvoir enregistrer plusieurs nuits de chaque site dans des conditions similaires optimales (sans pluie, sans vent, au sein d'une même saison). Les dates et heures ont ici été relevées en heure universelle (UTC+00) afin de standardiser les observations et pouvoir potentiellement servir dans d'autres études. Les heures représentées par la suite dans les graphiques sont toutes en "heure locale d'été" (UTC+2) correspondant à l'heure locale en France métropolitaine.

2.4. Mesures acoustiques : indices de diversité acoustique et identification par l'écoute

2.4.1. Indices de diversité acoustique

Les indices de diversité acoustique ont été développés pour obtenir une évaluation de la biodiversité par le son. Ils mesurent l'hétérogénéité acoustique produite par la biodiversité dans un milieu naturel ainsi que la diversité d'un paysage sonore en étudiant les variations fréquentielles, temporelles et d'intensité du signal sonore de celui-ci (Gasc *et al.*, 2017). Le choix des indices acoustiques s'est porté sur quatre indices utilisés dans les études acoustiques. Ils sont généralistes et correspondent aux attentes de l'étude en décrivant l'activité acoustique, mesurant la part de biophonie et d'anthropophonie dans nos données et étudiant les différentes fréquences enregistrées. La biophonie correspond à l'ensemble des sons émis par les êtres vivants d'un écosystème à l'exception des êtres humains. Les sons produits par les êtres humains sont donc, par opposition, de l'anthropophonie (Krause, 2008 ; Pijanowski *et al.*, 2011). Les indices sélectionnés :

- **Bioacoustic Index** - BIOAC (Boelman *et al.*, 2007) : mesure de l'aire sous la courbe du spectre moyen de l'enregistrement, incluant toutes les bandes de fréquences associées entre le volume sonore le plus élevé et le plus faible. L'aire est donc fonction du volume sonore et du nombre de fréquences utilisées lors de l'enregistrement.
- **Acoustic Complexity Index** - ACI (Pieretti *et al.*, 2011) : mesure les modulations acoustiques c'est-à-dire les variations de fréquences dans le temps de l'enregistrement. Un oiseau émet un son très variable comparativement à un bruit anthropique généralement de fréquence constante.

- **Normalized Difference Soundscape Index** - NDSI (Kasten *et al.*, 2012) : estime le niveau de perturbation anthropique du paysage sonore en calculant le rapport entre l'anthropophonie et la biophonie.
- **Number of Peaks of a frequency spectrum** - NP (Gasc *et al.*, 2013) : détermine le nombre de pics de fréquences du spectre moyen de l'enregistrement. Il augmente avec la diversité de l'activité acoustique. Afin de limiter toute confusion, il sera nommé NPIC dans la suite de l'étude.

En conséquence au grand nombre de fichiers obtenus, qui seront détaillés par la suite, le calcul des indices a été réalisé sous le logiciel de statistiques R (R Core Team, 2020) par le biais de calculs en parallèle afin d'optimiser le temps de traitement. Ces calculs en parallèle ont été effectués par le cluster de calcul de l'OSU-Institut Pythéas d'Aix-Marseille Université. Il s'agit d'un ensemble de machines, renforcées en processeur et mémoire, dédiées au calcul intensif. Les calculs d'indices ont été réalisés grâce aux packages *parallel* (R Core Team, 2020), *tuneR* (Ligges *et al.*, 2018), *seewave* (Sueur, Aubin, *et al.*, 2008) et la fonction *AcouIndexAlpha* (Gasc, 2020).

Tous les indices ont été calculés sur des séquences de 1 minute toutes les 10 minutes pour les enregistrements réalisés autour dans le protocole 1. Ainsi, 6 minutes par heure ont été échantillonnées pour cette première étude. Les indices ont également été calculés sur la première minute de chaque enregistrement réalisé dans le protocole 2.

2.4.2. Identification de la faune par l'écoute

Une identification auditive a été effectuée sur les séquences de 1 minute précédemment sélectionnées, durant la deuxième nuit de la période d'échantillonnage, de 20h00 à 6h00 du matin, sur les 40 sites des 20 villages. Chaque son détecté a fait l'objet, dans la mesure du possible, d'une identification. Le groupe des oiseaux étant un groupe fortement représenté dans les enregistrements et dont les compétences d'identifications n'étaient pas à acquérir, il a été décidé d'identifier ce groupe à l'espèce dans la mesure du possible. En cas de doute les identifications ont été réalisées avec l'aide du site Xeno-Canto (Xeno-Canto, 2020). Chaque identification par minute correspond à un contact : une même source émettant au moins un son dans la séquence d'une minute, les individus n'ont alors pas été dénombrés. Cette identification n'a malheureusement pas pu être réalisée sur la deuxième collection

d'enregistrements issus de la commune de Val-Buëch Méouge par manque de temps. La priorité a été donnée à l'écoute de la première collection.

La réalisation des écoutes s'est effectuée sous le logiciel Audacity (Audacity Team, 2020) grâce à l'aide de sonogrammes. Un sonogramme étant la représentation du son de manière visuelle, il est donc plus aisé de détecter la présence d'un son dans une portion d'enregistrement (figure 4).

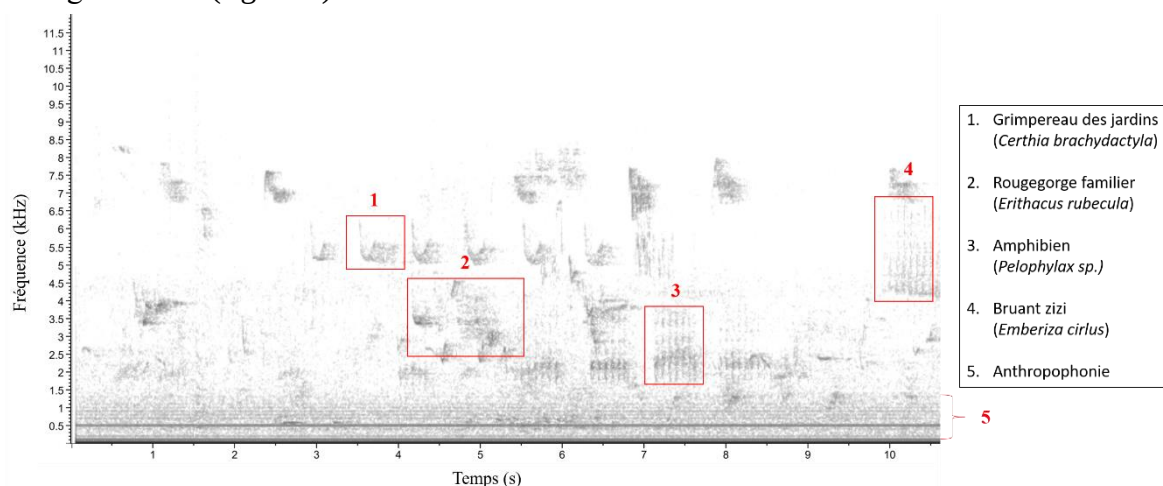


Figure 4 : Exemple de sonogramme permettant l'identification des sons. Chaque rectangle (et accolade) rouge représente un contact. Enregistrement effectué le 16 juin 2020 à 21h00 sur la commune de Reilhanette (26).

Sur cet exemple, 5 contacts sont représentés : au moins un son émis par cinq sources différentes. Il est possible de visualiser le gain de temps fourni grâce au sonogramme : visuellement et avec un peu d'expérience il est assez aisé de détecter ces cinq contacts rapidement.

2.5. Indices paysagers

Concernant les indices paysagers, deux indices généraux ont été choisis : ils permettent de qualifier l'organisation du paysage sur le territoire des Baronnies (Riitters *et al.*, 1995 ; Cain *et al.*, 1997). La prise en compte des surfaces relatives occupées par les divers modes d'occupation du sol doit être complétée par une analyse de l'agencement spatial de ces derniers (Burel et Baudry, 2004). Ainsi, un indice de diversité de Shannon - SHDI - (Shannon et Weaver, 1949) prenant en compte le nombre d'éléments du paysage ainsi que leur abondance relative a été choisi (P étant la proportion de la classe i) :

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i)$$

SHDI est nul (SHDI = 0) quand une seule classe est présente, puis va augmenter sans limite à mesure que le nombre de classe augmente et que leurs proportions sont également réparties (Shannon et Weaver, 1949 ; Hesselbarth *et al.*, 2019).

En complément, un indice de fragmentation - LSI - (Patton, 1975) relatif à leur morcellement a été calculé (E étant la longueur totale des bords des classes et min E, la taille totale des bords de la plus petite classe présente) :

$$LSI = \frac{E}{\min E}$$

Le LSI est égal à 1 lorsqu'une seule classe est présente. L'indice augmente, sans limite, à mesure que la longueur des bords augmente, c'est-à-dire que les classes deviennent moins compactes (Patton, 1975 ; Hesselbarth *et al.*, 2019).

Ces deux indices estiment l'hétérogénéité du paysage : c'est-à-dire la diversité et la complexité de la structuration spatiale de l'ensemble des classes d'occupation du sol à l'échelle de la zone tampon définie. Ici, cette zone tampon a été construite à partir du logiciel QGIS (QGIS Team, 2020) depuis le point d'enregistrement et en définissant une taille de 500m de rayon, ce qui correspond à une surface d'environ 80 hectares. Cette analyse de l'occupation du sol est basée sur le fichier Corine Land Cover de 2018 sur le périmètre du Parc des Baronnies. Cette distance de 500 m permet d'obtenir une variation des paysages avoisinant le site d'échantillonnage, soit la taille moyenne d'une classe dans cette commune : 20 hectares. L'ensemble du calcul des indices a été réalisé sous le logiciel R (R Core Team, 2020) avec les packages *sf* (Pebesma, 2018), *raster* (Hijmans, 2020) et *landscapemetrics* (Hesselbarth *et al.*, 2019).

2.6. Analyses statistiques

Les indices acoustiques ont été étudiés sous le logiciel R (R Core Team, 2020) en utilisant, pour la modélisation, des modèles linéaires mixtes. En effet, les modèles mixtes permettent de pallier la conséquence de l'autocorrélation spatiale de la mesure de brillance du fond de ciel (NSB) et du site d'échantillonnage. Le but de cette modélisation est de visualiser l'effet de variables explicatives (la distance au village, l'extinction du village, la brillance du ciel profond, l'heure, le site) sur la variance, soit la dispersion des valeurs de l'échantillon, des variables à expliquer (les indices acoustiques des deux protocoles ainsi que la variable du nombre de contacts des identifications acoustiques).

Une transformation de la variable heure a été nécessaire. En effet, l'étude s'est portée sur les heures de la nuit, donc de 20h00 à 07h00 (heure locale d'été française). Ainsi, pour étudier l'effet des heures il est important de transformer la variable heure (sous forme circulaire : 24h00 correspond à 00h00) en une variable heure sous forme linéaire et décimale (20h00 correspond à 0 et 07h00 correspond à 1100). Ainsi, les résultats des modélisations et des statistiques sont valables dans cet environnement décimal et ne peuvent être pris en compte comme un format horaire.

De plus, afin de comparer les moyennes des échantillons, des tests statistiques ont été réalisés sur les données d'identifications acoustiques. Un test de Student est un test d'hypothèse permettant de tester l'hypothèse nulle que deux échantillons suivant une loi normale ont la même moyenne. L'estimation de la loi normale est réalisée généralement par un test de Shapiro-Wilk. Ici, les échantillons étant de grande taille, il est possible de s'abstraire de ce test (Ghasemi et Zahediasl, 2012).

3. RÉSULTATS

3.1. Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)

3.1.1. Description des données obtenues

Les enregistrements nocturnes de quatre nuits pour 40 sites, ont fourni 1 760 fichiers pour un total de 1 730 heures et 1.2 Téraoctets.

Sur ces données, 440 heures ont été sélectionnées afin d'identifier la majorité des espèces d'oiseaux et de décrire les paysages acoustiques en identifiant les émissions sonores d'autres sources : météo (vent, pluie et son de rivière), sons d'origine anthropique (véhicule, voix humaine, musique, etc...), animaux domestiques (chien, coq, cloche de pâturage), ainsi que les taxons suivants : orthoptère, chiroptère, amphibien et mammifère. Ces résultats sont visibles dans la figure 5.

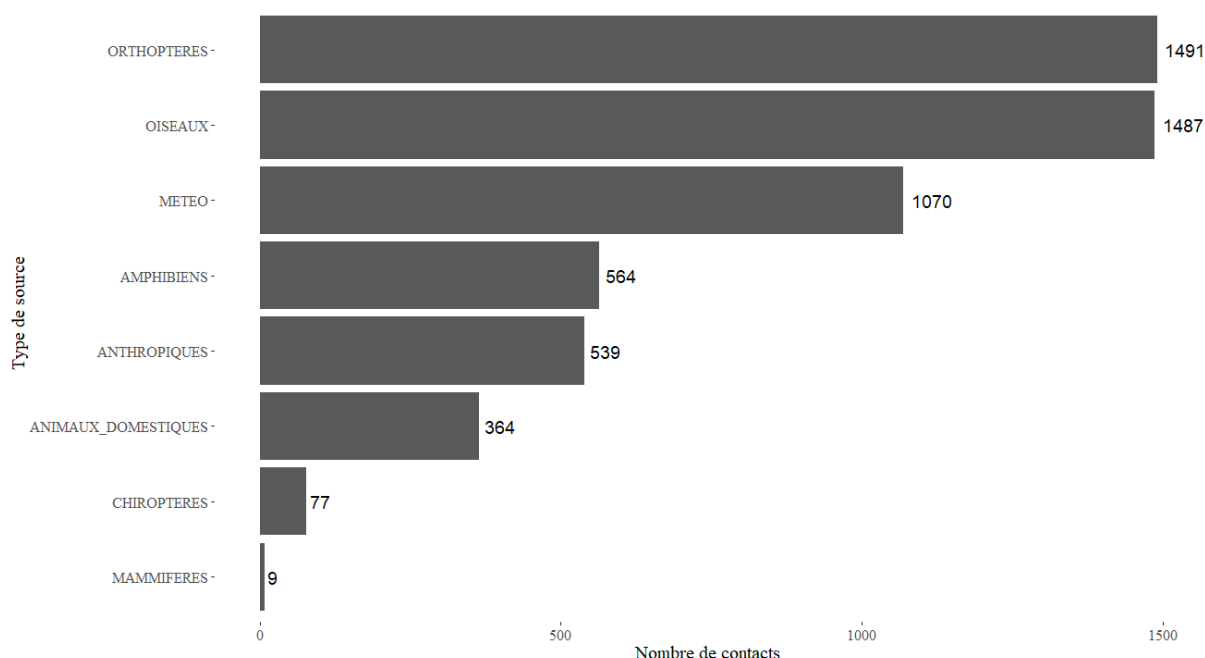


Figure 5 : Nombre de contacts émis par chaque type de source d'émission

Les orthoptères sont les sources acoustiques majoritaires en période nocturne avec les oiseaux.

Les chœurs du matin des oiseaux n'ont pu faire l'objet d'une description précise tant l'intensité, la diversité et l'hétérogénéité des sons produits était élevée. Ce sont donc 47 espèces d'oiseaux qui ont été recensées sur tous les sites du protocole 1 durant les périodes de 20h00 jusqu'au début du chœur matinal. Ce chœur apparaît majoritairement à partir de 05h00 (mois de juin 2020).

Les espèces les plus détectées dans cette période (hors de la période des chœurs) étant le Rossignol philomèle (*Luscinia megarhynchos*) contacté à 528 reprises, puis l'Alouette lulu (*Lullula arborea*) contactée à 292 reprises ainsi que le Merle noir (*Turdus merula*) contacté à 290 reprises.

3.1.2. Description des indices acoustiques

Afin de décrire les données, une représentation graphique de l'évolution des quatre indices calculés en fonction des heures a été réalisée (figure 6). La méthode utilisée est la méthode dite "de GAM", qui permet d'adapter un Modèle Additif Généralisé aux données et de visualiser l'évolution de ces dernières par une courbe.

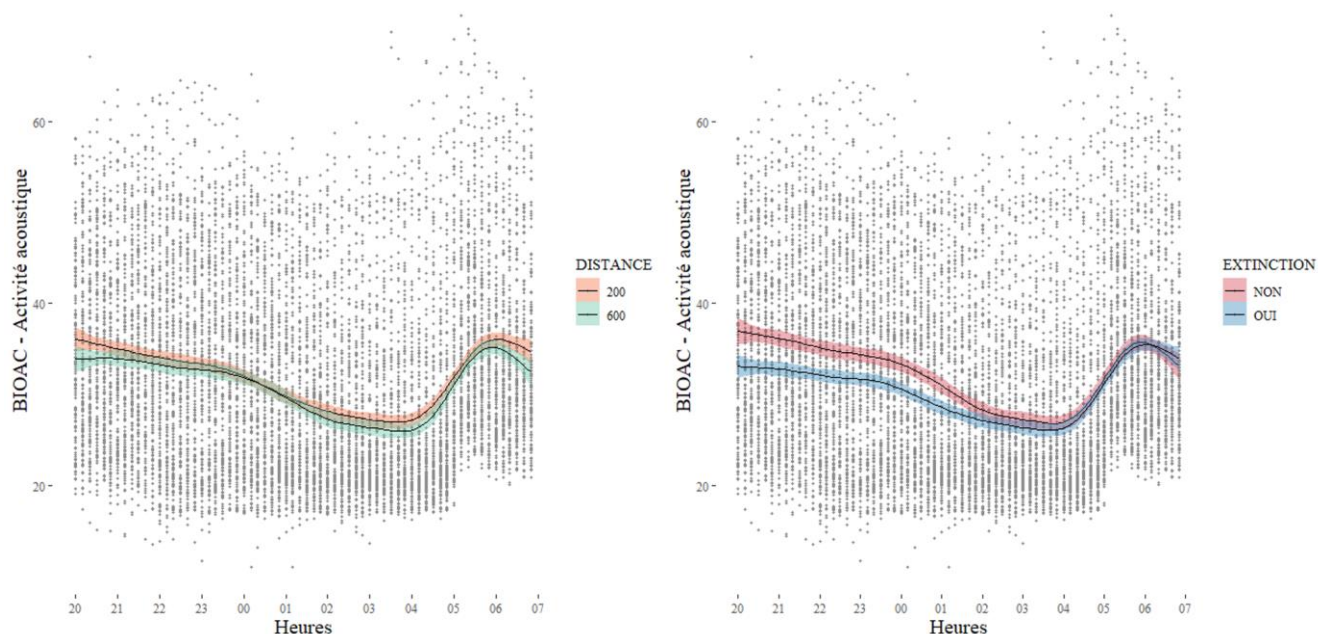


Figure 6 : Représentation de l'indice acoustique BIOAC en fonction des heures de la nuit et des facteurs des variables de distance et d'extinction du village.

Chaque indice possède un motif similaire d'évolution au cours de la nuit, l'ensemble des figures est disponible en annexe II. Ces variations sont plus ou moins marquées selon les indices mais sont quand même visibles. En effet, les indices vont atteindre un sommet en début de nuit, aux alentours de 21h00, puis diminuer progressivement jusqu'à 04h00. Après cela une augmentation est de nouveau visible pour atteindre le plus haut niveau vers 06h00. La comparaison est possible avec les identifications acoustiques (figure 7).

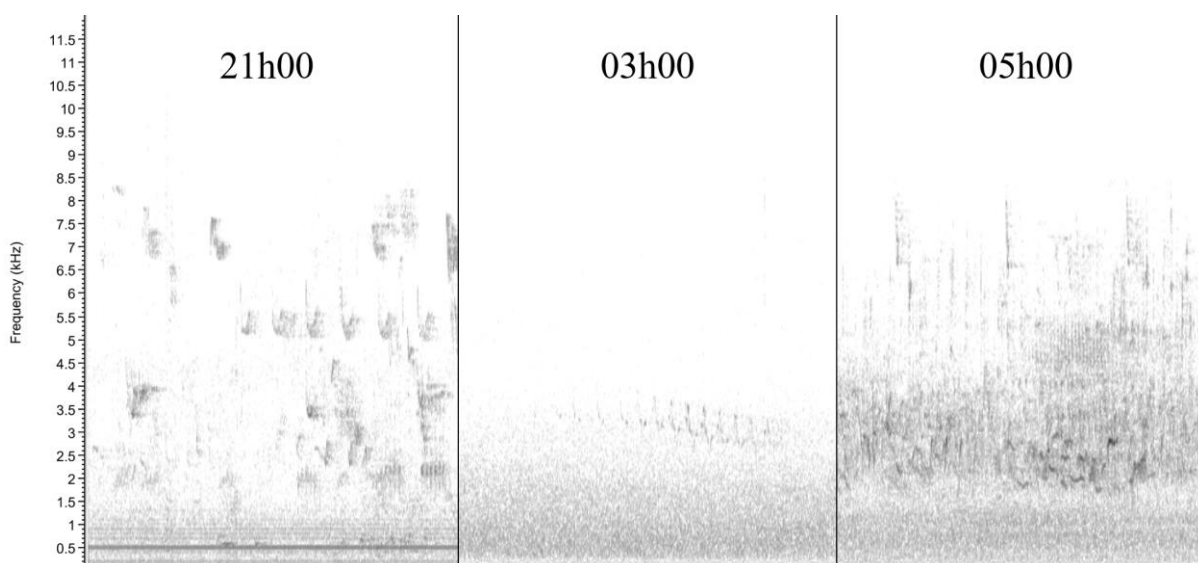


Figure 7 : Sonogrammes de trois séquences d'enregistrements représentant le changement d'activité acoustique en fonction des différentes heures de la nuit. Enregistrements effectués sur les communes de Reilhanette (26) le 16 juin 2020, Orpierre (05) le 23 juin 2020 et Curnier (26) le 13 juin 2020.

Les résultats observés sur la figure 6 correspondent aux écoutes effectuées sur ces mêmes séquences : il est observé une activité acoustique importante en fin de journée du fait du chœur des oiseaux notamment, puis cette activité diminue progressivement durant la nuit pour atteindre parfois des périodes de silence complet. Et en fin de nuit l'activité acoustique augmente de nouveau intensément, encore une fois liée aux chœurs des oiseaux.

3.1.3. Modélisation des indices acoustiques

La modélisation va nous permettre de visualiser l'évolution de nos indices acoustiques en fonction de variables explicatives fixes : l'heure, la distance au village et l'extinction ou non du village la nuit. Les variables explicatives à effet aléatoire sont : la brillance du fond de ciel et le site d'échantillonnage.

- BIOAC

La sélection de modèle permet d'obtenir un modèle final indiquant que l'évolution de l'indice BIOAC est uniquement expliqué par les heures (valeur de la statistique de $p < 2 \times 10^{-16}$). Lorsque BIOAC augmente d'une unité, la variable heure diminue de $3.0 \times 10^{-3} \pm 2.5 \times 10^{-4}$.

La distance au village ainsi que l'extinction ou non du village en période nocturne n'entrent pas dans cette explication de la variance de l'indice.

Le R2 marginal, le pourcentage de variance expliquée par les effets fixes, est de 0.8% et le R2 conditionnel, le pourcentage de variance expliquée par les effets fixes et aléatoires, est de 40%.

- ACI

De même que pour l'indice BIOAC, le modèle retenu ici est celui dont l'indice ACI est expliqué uniquement par les heures (valeur de la statistique de $p < 2 \times 10^{-16}$) et sans effet de la distance et de l'extinction. Ainsi, quand ACI augmente d'une unité, la variable exprimant les heures diminue de $4.3 \times 10^{-2} \pm 2.2 \times 10^{-3}$.

Le R2 marginal est de 2% et le R2 conditionnel est de 38%.

- NDSI

Pour cet indice, le modèle final montre que l'évolution du NDSI est expliqué par l'extinction nocturne du village (valeur de la statistique de $p = 0.02$). Lorsque le NDSI augmente d'une unité, la variable d'extinction avec le facteur "OUI" diminue de 0.3 ± 0.1 .

Dans ce modèle-ci, le R2 marginal est de 4%, et le R2 conditionnel est de 37%.

- NPIC

Le modèle le plus parcimonieux explique que l'évolution de l'indice NPIC est lié uniquement à l'évolution des heures de la nuit (valeur de la statistique de $p < 2 \times 10^{-16}$). La distance et l'extinction n'entrent pas en jeu dans ce modèle. Dans ce modèle, quand NPIC augmente d'une unité, la variable des heures diminue de $2.7 \times 10^{-3} \pm 1.8 \times 10^{-4}$.

Il possède un R2 marginal de 2% et un R2 conditionnel de 24%.

3.1.4. Tests statistiques des indices acoustiques

Les tests de comparaison de moyennes sont résumés dans le tableau 1. Ils permettent de déterminer si les moyennes des échantillons sont différentes. Si c'est le cas, il y aura donc une différence significative entre les deux catégories de la variable.

Tableau 1 : Valeur de la statistique p de la comparaison des moyennes des facteurs des variables extinction et distance au village.

Indice	Variable	Comparaison de moyenne (p.value)	Moyenne du facteur 1 (OUI / 200)	Moyenne du facteur 2 (NON / 600)
BIOAC	DISTANCE	0.1273	31.9767	31.2098
	EXTINCTION	0.0032	30.8537	32.3328
ACI	DISTANCE	0.0010	1646.875	1632.819
	EXTINCTION	0.4700	1641.398	1638.296
NDSI	DISTANCE	0.0002	-0.0614	0.0517
	EXTINCTION	2.2×10^{-16}	-0.1330	0.1233
NPIC	DISTANCE	0.9009	7.1159	7.1568
	EXTINCTION	0.0069	6.6931	7.5795

Les indices BIOAC (catégories d'extinction), ACI (catégories de distance) NDSI (catégories de distance et d'extinction) et NPIC (catégories d'extinction) ont des moyennes

significativement différentes. En effet, si la valeur de statistique p (p.value) est supérieure à 5%, alors il y a égalité des moyennes dans les deux échantillons.

3.1.5. Modélisation à partir des identifications acoustiques

Ici, il a été souhaité d'étudier l'évolution des contacts acoustiques durant la nuit en fonction de la brillance de fond de ciel, de la distance au village et de l'extinction par un modèle linéaire mixte. Il est important de rappeler qu'un contact acoustique est l'émission d'au moins un son par une source identifiable dans la séquence d'une minute.

Dans ce cas-là, le modèle le plus parcimonieux retenu est celui qui explique que l'évolution des contacts au cours de la nuit est liée à l'évolution de l'heure de la nuit uniquement. En effet, il s'agit du modèle le plus parcimonieux et celui possédant le plus petit critère d'information d'Akaike (AIC). Lorsque le nombre de contacts augmente d'une unité, la variable des heures diminue de $4.2e-04 \pm 4.0e-05$.

Le R^2 marginal pour ce modèle est de 6% et le R^2 conditionnel est de 36%.

- Tests statistiques

Les tests statistiques (Fisher et Student) réalisés afin de comparer les moyennes des catégories des variables de distance (200 m et 600 m) et d'extinction ("OUI" et "NON"), ne montrent pas de différence significative. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeur de la statistique p de la comparaison des moyennes des facteurs des variables extinction et distance au village.

Variable	Comparaison de moyenne (p.value)	Moyenne du facteur 1 (OUI / 200)	Moyenne du facteur 2 (NON / 600)
DISTANCE	0.5259	1.507177	1.484848
EXTINCTION	0.2267	1.618182	1.352941

3.2. Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)

3.2.1. Description des données obtenues

Pour ce protocole, l'échantillonnage a permis d'extraire, sur six nuits, 10 080 fichiers pour un total de 1.55 téraoctet et 840 heures d'enregistrement.

3.2.2. Description des indices acoustiques

Afin de décrire les données, une représentation graphique de l'évolution des quatre indices calculés en fonction des heures est réalisée. La méthode utilisée est la méthode dite "de GAM", qui permet d'adapter un Modèle Additif Généralisé aux données et de visualiser l'évolution de ces dernières par une courbe.

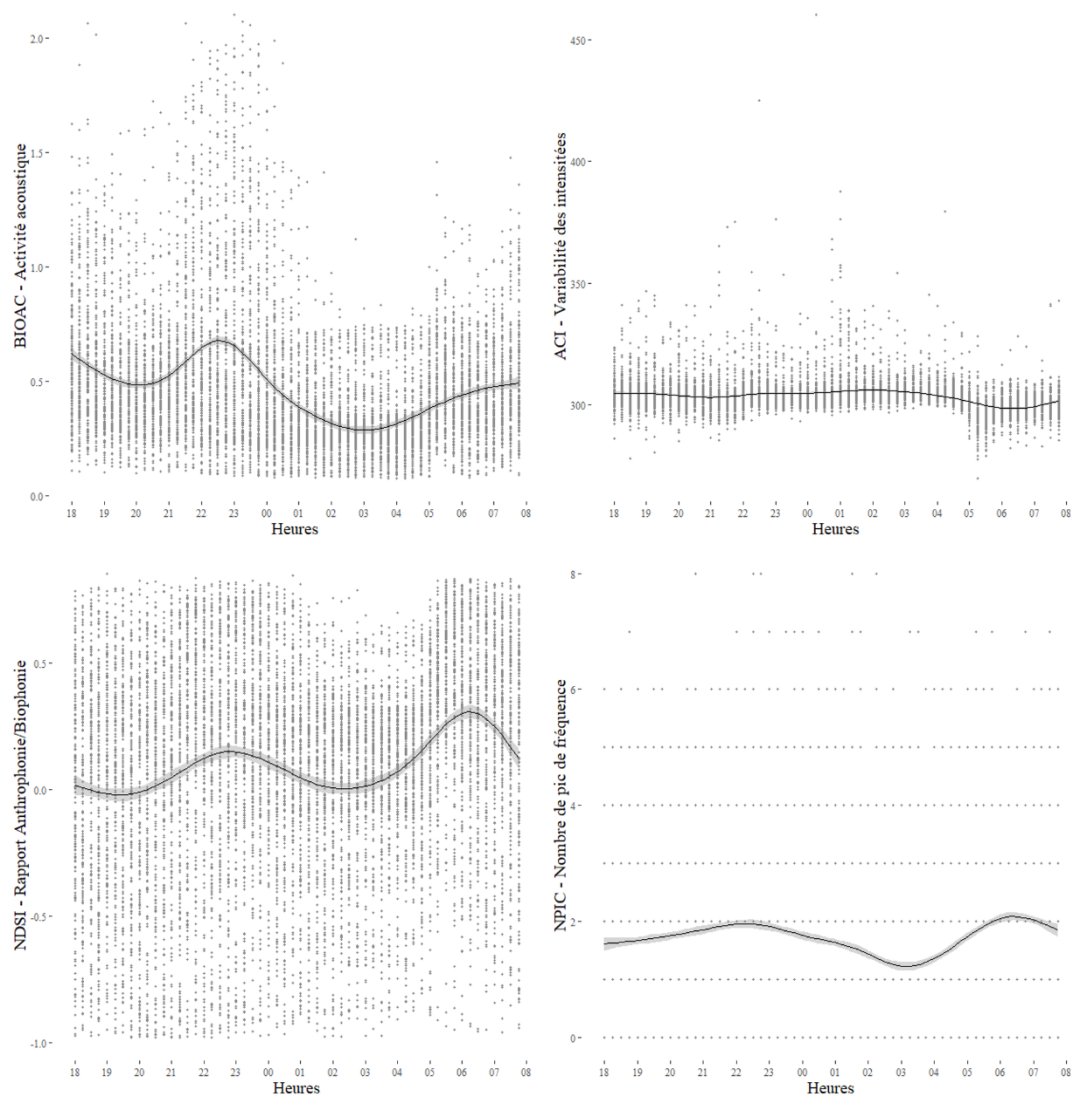


Figure 8 : Représentation de l'évolution des quatre indices acoustiques sélectionnés durant les heures de la nuit.

Malgré l'hétérogénéité de ces données, il est observable qu'un motif, de la même manière qu'au protocole 1, est identifiable dans ces représentations.

En effet, un pic d'activité acoustique est visible en cours de nuit, entre 22h00 et 23h00, puis une diminution de l'activité jusqu'à 04h00 ou 05h00 et enfin, une seconde augmentation pour atteindre un pic d'activité maximale vers 06h00.

3.2.3. Modélisation des indices acoustiques

De la même manière que pour le protocole 1, la modélisation va ici nous permettre de visualiser l'évolution de nos indices acoustiques en fonction de variables explicatives fixes : l'heure, et les indices paysagers choisis : LSI, estimant le morcellement des éléments du paysages et le SHDI estimant le nombre d'éléments et leur abondance relative. Les variables explicatives à effet aléatoire sont : la brillance du fond de ciel (NSB) et le site d'échantillonnage.

- BIOAC

L'indice d'activité bioacoustique est, dans cette modélisation, uniquement expliqué par l'indice SHDI (valeur de la statistique de $p = 0.02$) et par les heures de la nuit (valeur de la statistique de $p < 2 \times 10^{-16}$).

Lorsque l'indice BIOAC augmente d'une unité, l'indice SHDI augmente de $1.8e-01 \pm 7.3e-02$ et la variable heure diminue de $1.6e-04 \pm 6.1e-06$.

L'indice LSI n'entre pas dans cette explication de la variance de l'indice BIOAC.

Le R^2 marginal, le pourcentage de variance expliquée par les effets fixes, est de 8% et le R^2 conditionnel, le pourcentage de variance expliquée par les effets fixes et aléatoires, est de 30%.

- ACI

L'indice ACI est, dans cette modélisation, uniquement expliqué par la variable heure (valeur de la statistique de $p < 2 \times 10^{-16}$). Comme pour l'indice BIOAC, quand ACI augmente d'une unité, la variable des heures diminue de $3.2e-03 \pm 1.5e-04$.

Le R^2 marginal est de 4% et le R^2 conditionnel est de 13%.

- NDSI

Pour l'indice NDSI, de la même manière que pour ACI, seules les heures expliquent la variation de l'indice (valeur de la statistique de $p < 2 \times 10^{-16}$). Quand cet indice augmente d'une unité, la variable heure diminue de $1.6e-04 \pm 9.0e-06$.

Dans ce cas-là, le R^2 marginal est de 2% et le R^2 conditionnel est de 25%.

- NPIC

Cet indice, quant à lui, est expliqué uniquement par les indices paysagers : SHDI (p.value = 0.03) et LSI (p.value = 0.01). Les heures n'entrent pas dans l'explication de ce modèle. Ici, quand l'indice NPIC augmente d'une unité, l'indice SHDI augmente de 0.8 ± 0.4 et l'indice LSI diminue de 0.6 ± 0.2 .

Le R^2 marginal est de 3% et le R^2 conditionnel de 23%.

4. DISCUSSION

La présente étude a fourni de nombreuses données, l'équivalent de 6 mois d'enregistrement en continu. Cependant, malgré une apparente précision causée par cette quantité de données, nos hypothèses ne peuvent être validées. Cela est la conséquence de diverses raisons que nous allons détailler par la suite.

4.1. Influence de la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 1)

- *Indices acoustiques*

Il est intéressant de se rappeler que l'hypothèse était, dans ce protocole-ci, que la distance au village et l'extinction (ou non) de la lumière artificielle nocturne de ce dernier auraient une influence sur la biodiversité en période nocturne. En effet, la lumière artificielle étant perçue comme un dérangement important pour les êtres vivants, ces derniers auraient tendance à la fuir. Néanmoins, cela n'a pas pu être validé par cette étude. Les modèles sont formels : les variables de distance au village et d'extinction du village n'entrent pas dans l'explication de la variance de la variable de l'indice acoustique choisi (BIOAC, ACI ou NPIC). Seules les heures de la nuit expliquent cette variance. Quel que soit l'indice, lorsque ce dernier augmente d'une unité les heures diminuent.

En effet, selon l'heure de la nuit, l'activité acoustique est différente, produisant une évolution de la valeur des indices acoustiques. Les animaux, en particulier dans le cas présent les oiseaux, vont se partager le "temps acoustique" de la nuit : selon les heures, les espèces actives seront différentes (Luther, 2009). À l'aurore, les Merles noirs (*Turdus merula*), les Fauvettes à têtes noires (*Sylvia atricapilla*) ainsi que les Rossignols philomèles (*Luscinia megarhynchos*) utilisent l'intégralité de l'espace acoustique. En milieu de nuit et fin de nuit, ce sont les Alouettes lulu (*Lullula arborea*) et les Rossignols philomèles (*Luscinia megarhynchos*) qui

chantent et au petit matin ils laisseront leur place à l'arrivée des premiers chanteurs des chœurs matinaux.

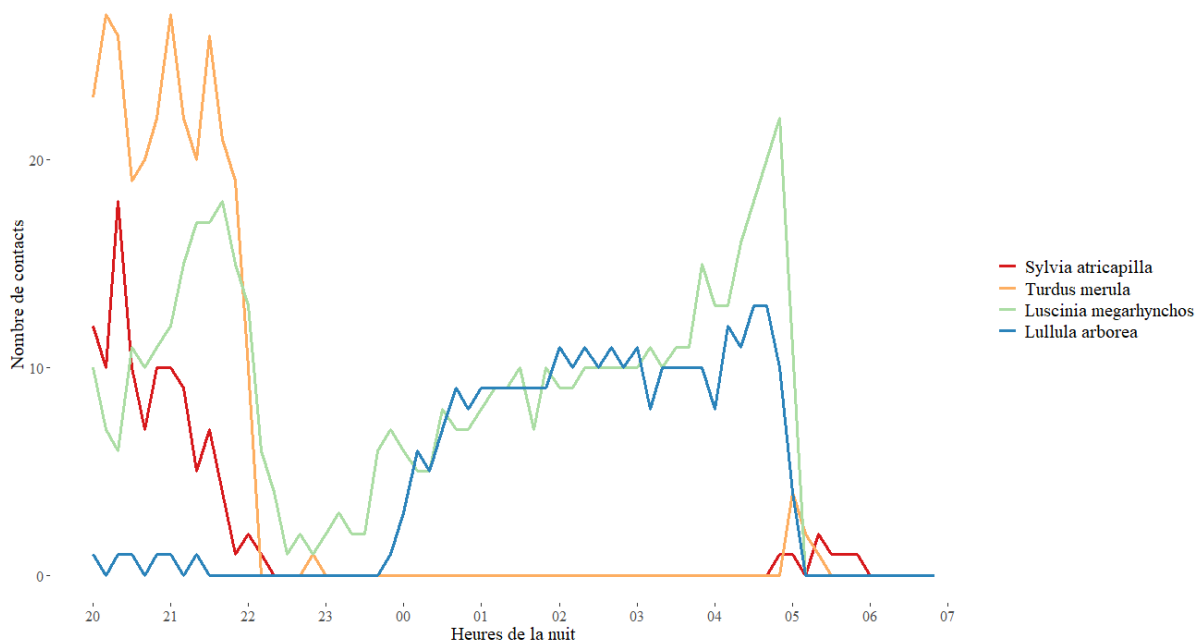


Figure 9 : Évolution du nombre de contacts par espèce selon les heures de la nuit

Cependant, le NDSI est quant à lui expliqué uniquement par l'extinction nocturne du village et cela de manière significative malgré une valeur de statistique p relativement faible ($p.value = 0.02$). Cela démontre un effet de l'extinction sur cet indice : une diminution de la variable extinction avec le facteur "OUI", signifiant donc que le fait de laisser le village éclairé toute la nuit, induit une augmentation de l'indice NDSI. Cet indice est calculé comme suit :

$$NDSI = \frac{biophonie - anthropophonie}{biophonie + anthropophonie}$$

Selon l'interprétation du modèle, le fait de laisser un village éclairé la nuit permet d'augmenter la biophonie, donc par conséquent la biodiversité.

Il s'agit d'une conclusion étonnante mais qui peut être expliquée. En effet, l'activité anthropique dans le Parc Naturel Régional des Baronnies provençales la nuit est particulièrement limitée (Parc Naturel Régional des Baronnies provençales, 2015). Ainsi les perturbations, hors pollution lumineuse, sont très réduites. La lumière artificielle, bien qu'étant une perturbation, peut donc devenir une opportunité pour certaines espèces : les oiseaux peuvent chanter plus tard le soir et plus tôt le matin (Da Silva *et al.*, 2015). De plus, les insectes sont particulièrement sensibles à l'attraction lumineuse (Wakefield *et al.*, 2016), ce qui favorise les

émissions sonores de leur part. Ces différents comportements peuvent donc expliquer l'augmentation de la biophonie quand il n'y a pas d'extinction lumineuse du village.

Concernant les modèles, les R^2 aident à comprendre ces résultats. Dans les modèles sont présents trois variables à effets fixes et deux variables à effets aléatoires. L'ensemble des modèles indiquent que le R^2 marginal, c'est à dire le R^2 exprimant le pourcentage de la variance expliqué par les effets fixes, est, dans chaque modèle, inférieur à 5%. Cela signifie que malgré l'importante significativité de nos variables à effets fixes, ces dernières n'expliquent que très faiblement la variance. Les R^2 conditionnels, ceux exprimant le pourcentage de variance expliquée par les effets fixes et aléatoires, sont quant à eux, bien plus élevés (supérieurs à 35% dans la plupart des cas à l'exception du modèle de l'indice NPIC). Cela signifie que nos variables à effets aléatoires, le site d'échantillonnage et la pollution lumineuse sur ce site, expliquent la variance de manière plus importante que les variables à effets fixes sélectionnées.

- *Tests statistiques des indices acoustiques*

Les tests statistiques réalisés permettent de déterminer l'égalité ou non des facteurs des variables de distance et d'extinction. En effet, si les deux facteurs sont significativement différents, cela confirme l'hypothèse de l'influence de la distance au village et de l'extinction du village sur la biodiversité. Cependant, il est important de prendre des précautions quant aux valeurs obtenues.

Comme il est possible de le constater, les facteurs de la variable extinction de l'indice BIOAC ont une moyenne significativement différente. Ce même constat est possible pour l'indice ACI avec la variable de distance, et pour l'indice NDSI avec les variables de distance et d'extinction. L'attention doit néanmoins être portée sur les valeurs moyennes de ces indices. Malgré le fait que le test statistique indique une différence parfois conséquente entre les moyennes, ces dernières sont remarquablement proches. Cela s'explique par la taille du jeu de données intégré dans les calculs des tests. Les moyennes ont donc des intervalles de confiance étroits, et qui ne se superposent pas entre les deux facteurs des variables de distance ou d'extinction ce qui les rend donc significativement différentes. Il est donc nécessaire ici, d'en déduire une limite statistique et de conclure qu'il n'y a peu ou pas de différence dans ce contexte écologique.

- *Identifications acoustiques*

L'écoute des enregistrements nocturnes est un très bon moyen de se plonger dans le milieu où l'enregistreur a été déposé. Là où un enregistreur vidéo doublerait ou triplerait le poids d'une heure d'enregistrement sans pour autant réellement apporter d'informations supplémentaires, l'enregistrement acoustique permet de s'immerger complètement sur le site. Il est donc possible d'entendre un jeune Hibou moyen-duc (*Asio otus*) de l'année en train d'appeler à quelques mètres de l'enregistreur, une Gallinule poule-d'eau (*Gallinula chloropus*) en vol en plein cœur de la nuit, un passage d'une harde de Sanglier d'Europe (*Sus scrofa*) ou même des concerts de Grillon champêtre (*Gryllus campestris*) et de Grenouilles vertes (*Pelophylax sp.*). Cette écoute permet ainsi de rapporter les indices acoustiques, les phénomènes rapportés par les chiffres à un contexte concret, mais cela permet aussi de comparer les résultats. En effet, la météo joue un rôle majeur dans l'acoustique : une mauvaise météo (pluie et vent) et les indices souhaités afin de déterminer les fréquences, les intensités ou variations des sons sont biaisés (Lengagne et Slater, 2002 ; Swaddle *et al.*, 2012). Les écoutes vont donc permettre de trier ces enregistrements et de ne conserver uniquement ceux où l'écoute a permis de déterminer que ni le vent, ni la pluie ne viendraient ajouter leurs fréquences à celles des oiseaux, des insectes ou des amphibiens. Mais malgré l'apparente simplicité de la détection de la pluie ou du vent sur un enregistrement, la réalité est autrement plus complexe. En effet, la pluie ne produit pas de son, le seul son détecté est celui de la goutte d'eau sur un élément (des feuilles, des branches, l'enregistreur lui-même). Une pluie fine, qui produit néanmoins des fréquences, est très difficilement détectable à l'écoute.

Dans notre cas, la pluie et le vent ont été anecdotiques pendant les enregistrements, ainsi il a été préféré de conserver la totalité des enregistrements afin que les indices influencés par la météo apportent néanmoins des informations.

Concernant la modélisation des contacts acoustiques en fonction des variables de distance, d'extinction et d'heures, il est intéressant de remarquer que le modèle expliquant le mieux la variance de cette variable est celui comprenant uniquement la variable des heures d'enregistrement. Cette conclusion est la même que pour les indices acoustiques : la majorité de ces derniers étant expliqués uniquement par les heures.

Il est possible de remarquer malgré tout une différence avec ces indices au niveau des tests statistiques. En effet, les moyennes des facteurs des variables d'extinction et de distance ne sont pas égales. L'explication est dans la continuité de celle des indices : le nombre d'échantillons

est relativement faible en comparaison des indices. Ainsi, les moyennes possèdent des intervalles de confiance bien plus importants et se superposent donc.

4.2. Influence de l'interaction de la structure du paysage avec la pollution lumineuse sur la biodiversité (protocole 2)

Les indices acoustiques BIOAC, ACI et NDSI sont majoritairement expliqués par les heures, comme pour le protocole 1. En effet, de même que le précédent protocole, les heures influencent particulièrement la diversité acoustique au sein des sites du fait du partage de l'espace et du temps acoustique par les êtres vivants. Néanmoins, quelques précisions peuvent être apportées.

La modélisation pour l'indice BIOAC dans ce protocole est expliquée par une influence conjointe de l'indice paysager SHDI et par les heures de la nuit. Ainsi, lorsque l'indice acoustique augmente, l'indice paysager augmente lui-aussi. Ce qui signifie que le nombre d'éléments dans le paysage autour du point d'échantillonnage augmente indiquant l'augmentation de la diversité paysagère. Cela coïncide avec les études actuelles expliquant que la diversité de paysage entraîne la diversité de communauté (Melles *et al.*, 2003 ; Krauss *et al.*, 2003). Les indices suivant, ACI et NDSI, sont eux aussi influencés majoritairement par les heures. Dans les deux cas, lorsque l'indice augmente d'une unité, la variable heure diminue. De la même manière que pour le protocole 1, cela est expliqué par le partage de l'espace par les êtres vivants produisant des sons la nuit, en particulier les oiseaux (Luther, 2009). Pour ces indices, les indices paysagers n'entrent pas dans l'explication de la variation des indices acoustiques. Mais l'indice NPIC est, quant à lui, influencé uniquement par les indices paysagers : SHDI (p.value = 0.03) et LSI (p.value = 0.01). Lorsque NPIC va augmenter, l'indice SHDI va augmenter de même : la diversité de paysage environnant le site d'échantillonnage augmentera donc de la même manière. L'indice LSI, lui, diminue quand NPIC augmente. Cela signifie que, malgré une augmentation de la diversité des classes, exprimée par le SHDI, ces classes de paysage deviennent plus compactes quand l'indice NPIC augmente. On peut considérer donc que NPIC va augmenter quand le paysage autour est de plus en plus hétérogène mais que les types d'occupations du sol ne sont pas trop compactes.

4.3. Conclusion sur les deux protocoles

Pour donner suite à ces analyses et modélisations, il est possible d'expliquer certaines conséquences de l'évolution des indices acoustiques et paysagers.

La grande majorité de la variance des indices acoustiques est expliquée par l'évolution des heures de la nuit. Ce qui semble assez compréhensible du fait du changement important d'activité acoustique d'une heure à l'autre. Néanmoins, certaines variables explicatives choisies dans les hypothèses initiales entrent en jeu pour expliquer une partie de ces variances. L'indice BIOAC est influencé par l'indice de diversité paysagère SHDI, l'indice NDSI est influencé par l'extinction du village, et l'indice NPIC peut être expliqué par l'évolution des indices paysagers : SHDI et LSI. Cela démontre bien, malgré l'influence majoritaire des heures, que les variables sélectionnées dans nos hypothèses possèdent une influence.

5. CONCLUSION

L'étude des indices acoustiques en fonction de la pollution lumineuse et des indices paysagers a donc démontré que les effets de ces variables sont faibles et n'influencent que très peu les indices acoustiques. Mais il est important de noter ces effets, malgré leur faible influence.

Ce travail a posé les bases d'une potentielle étude plus conséquente. En effet, la situation sanitaire du pays pendant le déroulement de cette dernière a limité les phases de terrain sans toutefois les empêcher. Il a donc été possible d'observer les avantages et inconvénients d'une telle étude et de pouvoir les transmettre afin d'envisager une seconde étude, complétant celle-ci et améliorant les conclusions en évitant les potentiels écueils.

L'amélioration la plus importante pourrait être apportée au choix des sites. En effet, les communes du Parc des Baronnies sont relativement homogènes quant à la pollution lumineuse présente, la variance de cette variable doit être augmentée en sélectionnant des pôles urbains plus importants. Néanmoins, les résultats produits par cette étude sont très encourageants, et méritent d'être améliorés et reproduits.

BIBLIOGRAPHIE

- ANPCEN. **2020**. « Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes ». 2020. <https://www.anpcen.fr>.
- Association AVEX. **2016**. « Cartes de pollution lumineuse européenne – AVEX 2016 ». 2016. https://www.avex-asso.org/dossiers/wordpress/fr_FR/la-pollution-lumineuse-light-pollution/cartes-de-pollution-europeenne-avex-2016.
- Audacity Team. **2020**. *Audacity(R): Free Audio Editor and Recorder*. <https://audacityteam.org/>.
- Boelman, Natalie T., Gregory P. Asner, Patrick J. Hart, et Roberta E. Martin. **2007**. « Multi-Trophic Invasion Resistance in Hawaii: Bioacoustics, Field Surveys, and Airborne Remote Sensing ». *Ecological Applications* 17 (8). <https://doi.org/10.1890/07-0004.1>.
- Boncoraglio, Giuseppe, et Nicola Saino. **2007**. « Habitat Structure and the Evolution of Bird Song: A Meta-Analysis of the Evidence for the Acoustic Adaptation Hypothesis ». *Functional Ecology* 21 (1). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2006.01207.x>.
- Burel, Françoise, et Jacques Baudry. **2004**. *Landscape Ecology: Concepts, Methods, and Applications*. Enfield, NH: Science Publ.
- Cain, Douglas H., Kurt Riitters, et Kenneth Orvis. **1997**. « A multi-scale analysis of landscape statistics ». *Landscape Ecology* 12 (4). <https://doi.org/10.1023/A:1007938619068>.
- Chalfin, Aaron, Benjamin Hansen, Jason Lerner, et Lucie Parker. **2019**. « Reducing Crime Through Environmental Design: Evidence from a Randomized Experiment of Street Lighting in New York City ».
- Challéat, Samuel. **2019**. *Sauver la nuit: comment l'obscurité disparaît, ce que sa disparition fait au vivant, et comment la reconquérir*. Paris: PP, Premier parallèle.
- Challéat, Samuel, Dany Lapostolle, et Johan Milian. **2018**. « L'environnement nocturne dans les territoires de montagne français, ressource et opérateur de transition vers la durabilité ». *Revue de géographie alpine*. <https://doi.org/10.4000/rga.3895>.
- Chen, Zhuo, et John J. Wiens. **2020**. « The Origins of Acoustic Communication in Vertebrates ». *Nature Communications* 11 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14356-3>.
- Coogan, Andrew N., et Cathy A. Wyse. **2008**. « Neuroimmunology of the Circadian Clock ». *Brain Research* 1232. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.087>.
- Da Silva, Arnaud, Mihai Valcu, et Bart Kempenaers. **2015**. « Light Pollution Alters the Phenology of Dawn and Dusk Singing in Common European Songbirds ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370 (1667). <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0126>.
- DarkSkyLab. **2020**. « Bureau d'étude DarkSkyLab ». 2020. <https://www.darks skylab.com>.

- Dimovski, Alicia M., et Kylie A. Robert. **2018**. « Artificial Light Pollution: Shifting Spectral Wavelengths to Mitigate Physiological and Health Consequences in a Nocturnal Marsupial Mammal ». *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology* 329 (8-9). <https://doi.org/10.1002/jez.2163>.
- Falchi, Fabio, Pierantonio Cinzano, Dan Duriscoe, Christopher C. M. Kyba, Christopher D. Elvidge, Kimberly Baugh, Boris A. Portnov, Nataliya A. Rybnikova, et Riccardo Furgoni. **2016**. « The New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness ». *Science Advances* 2 (6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>.
- Fotios, S, J Unwin, et S Farrall. **2015**. « Road Lighting and Pedestrian Reassurance after Dark: A Review ». *Lighting Research & Technology* 47 (4). <https://doi.org/10.1177/1477153514524587>.
- Gasc, Amandine. **2020**. *Soundscape analysis with R*. <https://github.com/agasc/Soundscape-analysis-with-R/blob/master/AcouIndexAlpha.r>.
- Gasc, Amandine, Dante Francomano, John B. Dunning, et Bryan C. Pijanowski. **2017**. « Future Directions for Soundscape Ecology: The Importance of Ornithological Contributions ». *The Auk* 134 (1). <https://doi.org/10.1642/AUK-16-124.1>.
- Gasc, Amandine, Jérôme Sueur, Sandrine Pavoine, Roseli Pellens, et Philippe Grandcolas. **2013**. « Biodiversity Sampling Using a Global Acoustic Approach: Contrasting Sites with Microendemics in New Caledonia ». Édité par David L. Roberts. *PLoS ONE* 8 (5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065311>.
- Ghasemi, Asghar, et Saleh Zahediasl. **2012**. « Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians ». *International Journal of Endocrinology and Metabolism* 10 (2). <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>.
- Hesselbarth, Maximilian H. K., Marco Sciaini, Kimberly A. With, Kerstin Wiegand, et Jakub Nowosad. **2019**. « landscapemetrics: an open-source R tool to calculate landscape metrics ». *Ecography* 42. <https://doi.org/10.1111/ecog.04617>.
- Hijmans, Robert J. **2020**. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Hölker, Franz, Timothy Moss, Barbara Griefahn, Werner Kloas, Christian C. Voigt, Dietrich Henckel, Andreas Hänel, et al. **2010**. « The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy ». *Ecology and Society* 15 (4). <https://doi.org/10.5751/ES-03685-150413>.
- Hölker, Franz, Christian Wolter, Elizabeth K. Perkin, et Klement Tockner. **2010**. « Light Pollution as a Biodiversity Threat ». *Trends in Ecology & Evolution* 25 (12). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>.
- International Dark-Sky Association. **2020**. « International Dark-Sky Association ». 2020. <https://www.darksky.org/>.
- Kasten, Eric P., Stuart H. Gage, Jordan Fox, et Wooyeong Joo. **2012**. « The Remote Environmental Assessment Laboratory's Acoustic Library: An Archive for Studying

- Soundscape Ecology ». *Ecological Informatics* 12.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.08.001>.
- Kates, Robert W. **2000**. « Population and Consumption: What We Know, What We Need to Know ». *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 42 (3).
<https://doi.org/10.1080/00139150009604872>.
- Krause, Bernie. **2008**. « Anatomy of the Soundscape: Evolving Perspectives ». *Journal of the Audio Engineering Society*.
- Krauss, Jochen, Ingolf Steffan-Dewenter, et Teja Tscharntke. **2003**. « How Does Landscape Context Contribute to Effects of Habitat Fragmentation on Diversity and Population Density of Butterflies? » *Journal of Biogeography* 30 (6).
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2003.00878.x>.
- Kumlien, Ludwig. **1888**. « Observations on Bird Migration at Milwaukee ».
- Kyba, Christopher C. M., Theres Kuester, Alejandro Sánchez de Miguel, Kimberly Baugh, Andreas Jechow, Franz Hölker, Jonathan Bennie, Christopher D. Elvidge, Kevin J. Gaston, et Luis Guanter. **2017**. « Artificially Lit Surface of Earth at Night Increasing in Radiance and Extent ». *Science Advances* 3 (11).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>.
- La, Van T. **2012**. « Diurnal and Nocturnal Birds Vocalize at Night: A Review ». *The Condor* 114 (2). <https://doi.org/10.1525/cond.2012.100193>.
- Le Tallec, Thomas, Martine Perret, et Marc Théry. **2013**. « Light Pollution Modifies the Expression of Daily Rhythms and Behavior Patterns in a Nocturnal Primate ». Édité par Paul A. Bartell. *PLoS ONE* 8 (11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079250>.
- Lengagne, Thierry, et Peter J. B. Slater. **2002**. « The Effects of Rain on Acoustic Communication: Tawny Owls Have Good Reason for Calling Less in Wet Weather ». *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 269 (1505).
<https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2115>.
- Ligges, Uwe, Sebastian Krey, Olaf Mersmann, et Sarah Schnackenberg. **2018**. *tuneR: Analysis of Music and Speech*. <https://CRAN.R-project.org/package=tuneR>.
- Longcore, Travis, et Catherine Rich. **2004**. « Ecological Light Pollution ». *Frontiers in Ecology and the Environment* 2 (4). [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2).
- Luther, David. **2009**. « The Influence of the Acoustic Community on Songs of Birds in a Neotropical Rain Forest ». *Behavioral Ecology* 20 (4).
<https://doi.org/10.1093/beheco/arp074>.
- Malher, Frédéric, et Jean-François Magne. **2010**. « L'urbanité des oiseaux ». *Ethnologie française* 40 (4). <https://doi.org/10.3917/ethn.104.0657>.
- Mellander, Charlotta, José Lobo, Kevin Stolarick, et Zara Matheson. **2015**. « Night-Time Light Data: A Good Proxy Measure for Economic Activity? » Édité par Guy J-P. Schumann. *PLOS ONE* 10 (10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139779>.

- Melles, Stephanie, Susan M. Glenn, et Kathy Martin. **2003**. « Urban Bird Diversity and Landscape Complexity: Species-Environment Associations Along a Multiscale Habitat Gradient ». *Conservation Ecology* 7 (1). <https://doi.org/10.5751/ES-00478-070105>.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. **2020**. « Corine Land Cover ». 2020. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/corine-land-cover-occupation-des-sols-en-france/>.
- Ministère de l'économie et des finances. **2020**. « Plan Cadastral Informatisé - Etalab ». 2020. <https://cadastre.data.gouv.fr/datasets/cadastre-etalab>.
- Musters, C J M, D J Snelder, et P Vos. **2009**. « The Effects of Coloured Light on Nature ».
- Nuit-France. **2020**. « Nuit France ». 2020. <https://www.nuitfrance.fr>.
- Operti, Felipe G., Erneson A. Oliveira, Humberto A. Carmona, Javam C. Machado, et José S. Andrade. **2018**. « The Light Pollution as a Surrogate for Urban Population of the US Cities ». *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 492. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.039>.
- Parc Naturel Régional des Baronnies provençales. **2015**. « Charte du Parc Naturel Régional des Baronnies provençales ».
- Patton, David R. **1975**. « A Diversity Index for Quantifying Habitat “Edge” ». *Wildlife Society Bulletin* 3 (4). www.jstor.org/stable/3781151.
- Pauwels, Julie. **2018**. « Light Pollution & Biodiversity: What Are the Levers of Action to Limit the Impact of Artificial Lighting on Nocturnal Fauna? »
- Pebesma, Edzer. **2018**. « Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data ». *The R Journal* 10 (1). <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>.
- Peden, Margie, et World Health Organization. **2004**. *World Report on Road Traffic Injury Prevention: Information Kit*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Pieretti, N., A. Farina, et D. Morri. **2011**. « A New Methodology to Infer the Singing Activity of an Avian Community: The Acoustic Complexity Index (ACI) ». *Ecological Indicators* 11 (3). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>.
- Pijanowski, Bryan C., Luis J. Villanueva-Rivera, Sarah L. Dumyahn, Almo Farina, Bernie L. Krause, Brian M. Napoletano, Stuart H. Gage, et Nadia Pieretti. **2011**. « Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape ». *BioScience* 61 (3). <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>.
- QGIS Team. **2020**. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org/>.
- R Core Team. **2020**. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Rich, Catherine, et Travis Longcore, éd. **2006**. *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington, DC: Island Press.

- Riitters, K. H., R. V. O'Neill, C. T. Hunsaker, J. D. Wickham, D. H. Yankee, S. P. Timmins, K. B. Jones, et B. L. Jackson. **1995**. « A Factor Analysis of Landscape Pattern and Structure Metrics ». *Landscape Ecology* 10 (1). <https://doi.org/10.1007/BF00158551>.
- Shannon, Claude E., et Warren Weaver. **1949**. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press.
- Shuboni, D., et L. Yan. **2010**. « Nighttime Dim Light Exposure Alters the Responses of the Circadian System ». *Neuroscience* 170 (4). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.08.009>.
- Siblet, Jean-Philippe. **2008**. « Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité. Synthèse bibliographique. » *Rapport MNHN-SPN / MEEDDAT*, n° 8.
- Slabbekoorn, Hans, et Ardie den Boer-Visser. **2006**. « Cities Change the Songs of Birds ». *Current Biology* 16 (23). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.10.008>.
- Slabbekoorn, Hans, et Thomas B. Smith. **2002**. « Habitat-Dependent Song Divergence in the Little Greenbul: An Analysis of Environmental Selection Pressures on Acoustic Signals ». *Evolution* 56 (9). <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2002.tb00199.x>.
- Sordello, Romain, Clémentine Azam, Yves Bas, Lucille Billon, Samuel Challeat, Christian Kerbiriou, Sébastien Vauclair, et Paul Verny. **2018**. « Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse ».
- Stracey, Christine M., Brady Wynn, et Scott K. Robinson. **2014**. « Light Pollution Allows the Northern Mockingbird (*Mimus Polyglottos*) to Feed Nestlings After Dark ». *The Wilson Journal of Ornithology* 126 (2). <https://doi.org/10.1676/13-107.1>.
- Sueur, Jérôme, T. Aubin, et C. Simonis. **2008**. « Seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis ». *Bioacoustics* 18. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09524622.2008.9753600>.
- Sueur, Jérôme, et Almo Farina. **2015**. « Ecoacoustics: The Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound ». *Biosemitotics* 8 (3). <https://doi.org/10.1007/s12304-015-9248-x>.
- Sueur, Jérôme, Almo Farina, Amandine Gasc, Nadia Pieretti, et Sandrine Pavoine. **2014**. « Acoustic Indices for Biodiversity Assessment and Landscape Investigation ». *Acta Acustica United with Acustica* 100 (4). <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>.
- Sueur, Jérôme, Sandrine Pavoine, Olivier Hamerlynck, et Stéphanie Duvail. **2008**. « Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal ». Édité par David Reby. *PLoS ONE* 3 (12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>.
- Swaddle, John P., Caitlin R. Kight, Saji Perera, Eduardo Davila-Reyes, et Shena Sikora. **2012**. « Chapter 6: Constraints on acoustic signaling among birds breeding in secondary cavities: The effects of weather, cavity material, and noise on sound propagation - Limitaciones de las Señales Acústicas en Aves que se Reproducen en Cavidades Secundarias: Efectos del Clima, el Material de la Cavidad y el Ruido en la Propagación del Sonido ». *Ornithological Monographs* 74 (1). <http://www.jstor.org/stable/10.1525/om.2012.74.1.63>.

The Earth Observations Group. **2020**. « Version 1 VIIRS Day/Night Band Nighttime Lights ». Version 1 VIIRS Day/Night Band Nighttime Lights. 2020. https://eogdata.mines.edu/download_dnb_composites.html.

Towsey, Michael, Jason Wimmer, Ian Williamson, et Paul Roe. **2014**. « The Use of Acoustic Indices to Determine Avian Species Richness in Audio-Recordings of the Environment ». *Ecological Informatics* 21. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.11.007>.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, et Population Division. **2019**. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*.

Wakefield, Andrew, Moth Broyles, Emma L. Stone, Gareth Jones, et Stephen Harris. **2016**. « Experimentally Comparing the Attractiveness of Domestic Lights to Insects: Do LEDs Attract Fewer Insects than Conventional Light Types? » *Ecology and Evolution* 6 (22). <https://doi.org/10.1002/ece3.2527>.

Xeno-Canto. **2020**. « Xeno-Canto ». 2020. <https://www.xeno-canto.org/>.

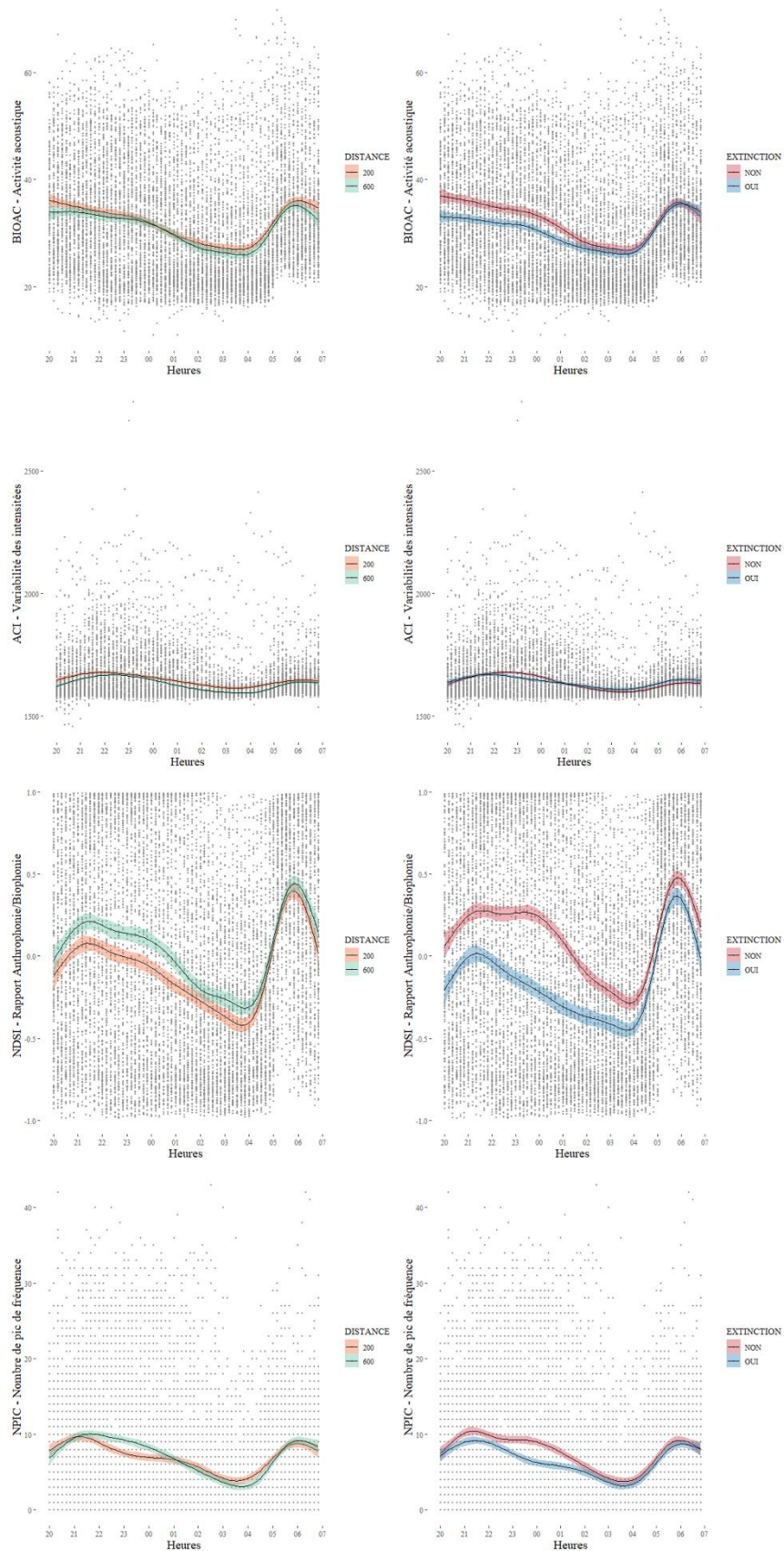
COMMUNICATIONS PERSONNELLES

1. Communication téléphonique avec les maires des communes sélectionnées. Beaucoup expriment le fait que l'extinction nocturne est la conséquence de la dépense d'électricité de la commune.
2. Communication téléphonique avec les maires des communes sélectionnées.
3. Communication par courriel avec Sébastien Vauclair – directeur de DarkSkyLab.

Annexe I : Liste des communes sélectionnées pour le protocole 1

COMMUNE	DÉPARTEMENT	EXTINCTION NOCTURNE
Aubres	26	NON
Barret-sur-Méouge	5	OUI
Chabestan	5	NON
Curnier	26	OUI
Eygaliers	26	OUI
Garde-Colombe	5	NON
La Roche-Saint-Secret-Béconne	26	NON
La Roche-sur-le-Buis	26	OUI
Lachau	26	NON
Le Bersac	5	OUI
Montbrun-les-Bains	26	OUI
Montjoux	26	OUI
Orpierre	5	NON
Propiac	26	NON
Reilhanette	26	OUI
Sahune	26	OUI
Saint-Ferréol-Trente-Pas	26	NON
Trescléoux	5	NON
Val-Buëch-Méouge	5	NON
Venterol	26	OUI

Annexe II : Représentation des indices acoustiques en fonction des heures de la nuit et des facteurs des variables de distance et d'extinction du village.



Annexe III : Photographie des deux types d'enregistreurs utilisés pour l'étude.



RÉSUMÉ

La pollution lumineuse a des effets néfastes sur la biodiversité et est aussi fortement influencée par l'occupation du sol. L'étude ici-présente mesure ces paramètres par la méthode de l'éco-acoustique au sein du Parc Naturel Régional des Baronnies provençales durant le mois de juin 2020. Quatre indices acoustiques sont mesurés pour cela : BIOAC, ACI, NDSI et NPIC. L'étude de leur variance met en relation ces indices avec les heures de la nuit, la distance au village le plus proche, l'extinction de ce village, la pollution lumineuse modélisée au site d'échantillonnage et deux indices paysagers sont déterminés : SHDI et LSI.

Les heures de la nuit apparaissent comme le principal effet régissant le changement de paysage acoustique autour des villages du Parc Naturel Régional. Néanmoins, des effets de la pollution lumineuse par la distance au village et l'extinction, ainsi que l'occupation du sol moins marqués, sont observés et nécessiteraient l'approfondissement de l'étude.

Mots-clés : Pollution lumineuse, occupation du sol, éco-acoustique, sonogramme, conservation

ABSTRACT

Light pollution has adverse effects on biodiversity and is also strongly influenced by land use. The study here measures these parameters using the eco-acoustic method within the Parc Naturel Régional of Baronnies Provençales during the month of June 2020. Four acoustic indices are measured for this: BIOAC, ACI, NDSI and NPIC. The study of their variance relates these indices with the hours of the night, the distance to the nearest village, the extinction of this village, the light pollution modeled at the sampling site and two landscape indices are determined: SHDI and LSI.

The hours of the night appear as the main effect governing the change of acoustic landscape around the villages of the Regional Natural Park. However, the effects of light pollution by distance to the village and extinction, as well as land use, less marked, are observed and would require further study.

Keywords: Light pollution, land use, eco-acoustics, sonogram, conservation