

**COLLEGE SCIENCES & TECHNOLOGIES POUR L'ENERGIE ET L'ENVIRONNEMENT DE LA COTE BASQUE**

Université de Pau et des Pays de l'Adour

**Licence Professionnelle Métiers de la Protection et de la gestion de l'Environnement**

**Parcours Biologie Appliquée aux Ecosystèmes Exploités**

---

## **SUIVI DE LA MIGRATION NOCTURNE PAR ÉCOUTE ACOUSTIQUE : UNE MÉTHODE INNOVANTE PERMETTANT UNE MEILLEURE APPRÉHENSION DES ÉCOSYSTÈMES**

---



Crédit : Noah Reiter / Audubon Photography Awards

**CLÉMENT RIMBERT**

**Alternance effectuée du 29/08/2022 au 30/08/2023**

**à NCA Environnement, 11 Allée Jean Monnet, 86170 Neuville-de-Poitou**

**sous la direction scientifique de M. Glenn SHILLITO**



*"Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil"*

## Résumé

Parmi les 2000 espèces d'oiseaux migrateurs dans le monde, près des 2/3 effectuent cette migration partiellement ou totalement de nuit. Cependant, les méthodes et les outils de suivi de cette migration nocturne sont encore peu développés et donc rarement utilisés hors du contexte universitaire. À travers l'état initial d'une étude d'impact sur un potentiel site d'accueil d'un projet photovoltaïque, nous avons utilisé la méthode d'échantillonnage par écoute acoustique dans l'optique d'évaluer l'apport de cette dernière dans un contexte réglementaire de diagnostic environnemental. Grâce aux données récoltées par un enregistreur acoustique passif, nous avons contactés 2600 individus appartenant à 39 espèces différentes. En mettant en relation ces données avec les données météorologiques, nous avons pu mettre en évidence une corrélation négative de la température et du vent sur le nombre d'oiseaux contactés.

**Mots-clefs** : migration nocturne, oiseaux, Nocturnal Flight Call, météorologique, étude d'impact, phénologie

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'entreprise NCA Environnement par l'intermédiaire de son dirigeant Aymeric MINOT pour m'avoir accueilli en alternance au sein de cette entreprise.

Mes remerciements se portent tout particulièrement à l'ensemble du secteur « Milieu naturel » représenté par Elodie BOSSELET (responsable du secteur MN) pour m'avoir fait confiance tout au long de cette année d'apprentissage, ainsi qu'à l'ensemble des chargé.e.s d'études pour leur gentillesse et leur accueil. Je remercie bien évidemment Glenn SHILLITO (chargé d'études faune) pour son aide précieuse et ses conseils avisés en tant que maître d'apprentissage, tant sur la thématique d'alternance que dans les aspects traitement de données, analyses et interprétations des résultats, ou d'un point de vue purement naturaliste.

De plus, je remercie Lou-Anh RAVAINÉ, alternante en Licence Professionnelle ATIB, pour la collaboration efficace, le partage de connaissances sur cette thématique de la migration nocturne et bien évidemment le traitement des données. Je remercie aussi Lionel MANCEAU, Chargé d'études faune et référent ornithologie, pour la formation apportée sur les aspects bioacoustiques et sur la migration nocturne.

## PRESENTATION DE LA STRUCTURE

NCA Environnement est un bureau d'études créé en 1988 par Philippe BOUTEILLER. À l'origine, les missions de la structure étaient portées sur la réalisation d'audits sur des exploitations agricoles. Peu à peu l'offre des services proposés s'est diversifiée, de nouveaux secteurs se sont créés et de nouvelles antennes à Saintes, Hennebont ou encore Châteauroux, sont venues s'ajouter au siège social historique, à Neuville-de-Poitou dans la Vienne (86).

Aujourd'hui, le bureau d'études NCA Environnement compte près de 90 salariés répartis dans 8 secteurs différents (Hydraulique Urbaine, Hydraulique Fluviale, Agriculture et Environnement, Energies Renouvelables, Paysage, Stratégie Bas Carbone et Milieu Naturel).

Le secteur Milieu Naturel (MN) a été créé en 2011 pour faire face à la demande croissante de diagnostics écologiques dans le cadre d'études réglementaires d'implantations de projets d'énergie renouvelable (EnR). Il compte à l'heure actuelle 19 personnes, allant de la responsable de secteur aux chargés d'études faune/flore et habitats, en passant par les managers, les alternants ou encore les stagiaires. Les missions du secteur sont principalement dominées par la réalisation d'évaluations environnementales et d'études d'impacts dans le cadre de projet EnR, même si certaines affaires se détachent par leur aspect plus original. Ainsi, les aménagements de voiries ou encore la réhabilitation de bâtiments classés en prenant en compte la biodiversité rentrent dans le champ de compétences du secteur MN.

# TABLE DES MATIERES

|          |                                                                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Remerciements</b>                                                                                          |           |
| <b>2</b> | <b>Présentation de la structure</b>                                                                           |           |
| <b>3</b> | <b>Introduction .....</b>                                                                                     | <b>1</b>  |
| 3.1      | Développement de projets EnR et biodiversité .....                                                            | 2         |
| 3.2      | Prise en compte de la migration nocturne de l'avifaune pour un bureau d'études...                             | 3         |
| 3.2.1    | Etude d'impact et séquence ERC .....                                                                          | 3         |
| 3.2.2    | Migration nocturne et bureau d'études .....                                                                   | 5         |
| 3.3      | Etat des lieux des méthodes actuellement utilisées pour le suivi de la migration nocturne de l'avifaune ..... | 5         |
| 3.4      | Problématique et fil directeur .....                                                                          | 6         |
| <b>4</b> | <b>Matériel et méthode .....</b>                                                                              | <b>7</b>  |
| 4.1      | Site d'étude.....                                                                                             | 7         |
| 4.2      | Période d'échantillonnage.....                                                                                | 8         |
| 4.3      | Matériel de captation .....                                                                                   | 8         |
| 4.3.1    | Choix des enregistreurs.....                                                                                  | 8         |
| 4.3.2    | Paramétrage de l'enregistreur .....                                                                           | 10        |
| 4.4      | Traitement des données acoustiques .....                                                                      | 10        |
| 4.4.1    | Logiciel de traitement .....                                                                                  | 10        |
| 4.4.2    | Méthode d'identification .....                                                                                | 12        |
| 4.4.3    | Archivage des données récoltées.....                                                                          | 12        |
| 4.5      | Test de détection.....                                                                                        | 13        |
| 4.5.1    | Test de nuit.....                                                                                             | 14        |
| 4.5.2    | Test de jour.....                                                                                             | 15        |
| 4.5.3    | Traitement des données obtenues .....                                                                         | 15        |
| 4.6      | Données météorologiques .....                                                                                 | 15        |
| 4.7      | Analyses statistiques .....                                                                                   | 17        |
| <b>5</b> | <b>Résultats .....</b>                                                                                        | <b>18</b> |
| 5.1      | Test de détection .....                                                                                       | 18        |

|          |                                             |           |
|----------|---------------------------------------------|-----------|
| 5.2      | Prospections nocturnes .....                | 19        |
| 5.3      | Analyses statistiques .....                 | 21        |
| 5.3.1    | Analyse des Composantes principales .....   | 21        |
| 5.3.2    | Analyse Factorielle de Correspondance ..... | 24        |
| <b>6</b> | <b>Discussion .....</b>                     | <b>25</b> |
| <b>7</b> | <b>Conclusion.....</b>                      | <b>29</b> |
| <b>8</b> | <b>Annexes .....</b>                        | <b>32</b> |

## LISTE DES FIGURES

|             |                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURE 1 :  | EVOLUTION DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE EOLIENNE ET PHOTOVOLTAÏQUE EN FRANCE .....                                                                                                                                               | 2  |
| FIGURE 2 :  | SCHEMA RESUMANT LE FONCTIONNEMENT DE LA SEQUENCE ERC .....                                                                                                                                                                        | 3  |
| FIGURE 3 :  | PERIODES DE PROSPECTIONS POUR L'AVIFAUNE DANS LE CADRE D'UNE ETUDE D'IMPACTS.....                                                                                                                                                 | 4  |
| FIGURE 4 :  | CARTOGRAPHIE DES DIFFERENTS ZONAGES DU PROJET .....                                                                                                                                                                               | 7  |
| FIGURE 5 :  | ENREGISTREUR SM MINI OPERATIONNEL .....                                                                                                                                                                                           | 9  |
| FIGURE 6 :  | INTERFACE D'AUDACITY POUR LE TRAITEMENT DES NUITS D'ENREGISTREMENT .....                                                                                                                                                          | 11 |
| FIGURE 7 :  | COURBE DE REPONSE DE LA SENSIBILITE DE DIFFERENTS ENREGISTREURS .....                                                                                                                                                             | 14 |
| FIGURE 8 :  | DIAGRAMME REPRESENTANT LE NOMBRE D'INDIVIDUS CONTACTES POUR CHAQUE NUIT SUR<br>L'ENSEMBLE DE LA PERIODE MIGRATOIRE PRENUPTIALE .....                                                                                              | 19 |
| FIGURE 9 :  | NOMBRE DE CONTACTS DES 15 ESPECES LES PLUS ABONDANTES SUR LA PERIODE DE MIGRATION<br>PRENUPTIALE (NOCTURNE) .....                                                                                                                 | 20 |
| FIGURE 10 : | REPRESENTATION DES COEFFICIENTS DE CORRELATIONS DES DIFFERENTES VARIABLES<br>METEOROLOGIQUES EN FONCTION DU NOMBRE DE CONTACTS D'OISEAUX .....                                                                                    | 21 |
| FIGURE 11 : | REPRESENTATION GRAPHIQUE DES VALEURS PROPRES (VALEUR EGALE AU POURCENTAGE DE<br>VARIANCE EXPLIQUEE) DE CHACUNE DES DIMENSIONS CREEES PAR L'ACP POUR LA MIGRATION NOCTURNE<br>DE L'AVIFAUNE ET LES PARAMETRES METEOROLOGIQUES..... | 21 |
| FIGURE 12 : | AXE F1 ET F2 DE L'ACP, COMPRENANT LES 6 VARIABLES RETENUES .....                                                                                                                                                                  | 22 |
| FIGURE 13 : | REPRESENTATION GRAPHIQUE DES VALEURS PROPRES DE CHACUNE DES DIMENSIONS DE L'AFC....                                                                                                                                               | 24 |
| FIGURE 14 : | AXES F1-F2 DE L'AFC, COMPRENANT LES 36 TAXONS D'OISEAUX UTILISES POUR L'ANALYSE .....                                                                                                                                             | 25 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLEAU 1 : PARAMETRES AUDACITY .....                                                                           | 11 |
| TABLEAU 2 : TABLEAU DE COMPILATION ET D'ARCHIVAGE DES DONNEES RECOLTEES EN SUIVI DE MIGRATION<br>NOCTURNE ..... | 13 |
| TABLEAU 3 : DONNEES METEOROLOGIQUES ET LEUR SIGNIFICATION .....                                                 | 16 |
| TABLEAU 4 : TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS OBTENUS LORS DU TEST DE DETECTION DE NUIT .....                 | 18 |
| TABLEAU 5 : TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS OBTENUS LORS DU TEST DE DETECTION DE JOUR .....                 | 18 |
| TABLEAU 6 : RECAPITULATIF DES TESTS DE SPEARMAN PAR VARIABLE TESTEE .....                                       | 23 |

## LISTE DES ANNEXES

|                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ANNEXE 1 : LISTE DE L'ENSEMBLE DES ESPECES CONTACTEES EN PERIODE NOCTURNE .....                                                                                                                                                | 32 |
| ANNEXE 2 : TABLEAU OBTENU APRES LA FUSION DES DONNEES METEOROLOGIQUES ET DU NOMBRE DE CONTACTS<br>.....                                                                                                                        | 33 |
| ANNEXE 3 : TABLEAU UTILISE POUR L'AFC.....                                                                                                                                                                                     | 33 |
| ANNEXE 4 : TABLEAU DE SUIVI DES TEMPS DE TRAITEMENT SUR 10 NUITS D'ECHANTILLONNAGE .....                                                                                                                                       | 34 |
| ANNEXE 5 : TABLEAU DES TACHES. LAR : LOU-ANH RAVAIN, ALTERNANTE / LM : LIONEL MANCEAU,<br>CHARGE D'ETUDES REFERENT AVIFAUNE/ GS : GLENN SHILLITO, MAITRE D'ALTERNANCE ET CHARGE<br>D'ETUDES FAUNE / CR : CLEMENT RIMBERT ..... | 34 |
| ANNEXE 6 : NUIT D'ECOUTE SATURÉE PAR LE VENT.....                                                                                                                                                                              | 34 |
| ANNEXE 7 : DIAGRAMME DE GANTT SUJET D'ALTERNANCE .....                                                                                                                                                                         | 35 |
| ANNEXE 8 : ENREGISTREMENT D'UN CRI D'ÆDICNEME CRIARD DE NUIT.....                                                                                                                                                              | 35 |
| ANNEXE 9 : ECHANTILLONS D'ENREGISTREMENTS NOCTURNES DE DIFFERENTES ESPECES .....                                                                                                                                               | 35 |

# 1. INTRODUCTION

Les menaces d'origine anthropique font parties des causes majeures d'effondrement des populations animales et végétales. Les 5 menaces principales qui pèsent sur la biodiversité [artificialisation des milieux naturels, surexploitation des ressources et des habitats, changement climatique, pollutions et introduction d'espèces exotiques envahissantes] peuvent toutes être reliées de près ou de loin à *Homo sapiens* (Sponsel, s. d.). Les oiseaux, du fait de leur abondance, de leur répartition et de leur diversité tant écologique que comportementale sont souvent de bons indicateurs de l'état de conservation d'un milieu, à minima sur le plan de la biodiversité (Gregory & Strien, 2010). Il est donc nécessaire de s'y intéresser afin d'atténuer l'impact de l'Homme sur son environnement, et ainsi de concilier les besoins et les usages.

Tout humain sur cette planète a déjà pu observer un oiseau. Les plus attentifs auront pu déceler d'importantes variations de leurs effectifs et de leur richesse spécifique en fonction des saisons. Le phénomène de migration se caractérise par un déplacement à plus ou moins grande échelle, motivé génétiquement par la recherche d'un habitat plus favorable (Réseau Migration, 2023). Pour la faune, c'est une question de survie : la température, la prédation ou la recherche de nourriture sont autant d'éléments explicatifs, poussant des centaines de millions d'individus à se déplacer. De quelques dizaines de kilomètres pour les migrateurs partiels comme le Rougegorge familier à plusieurs dizaines de milliers pour les plus endurants comme la Sterne arctique ou la Barge rousse (Réseau Migration, 2023), c'est au grès des saisons que se dessine le paysage avifaunistique.

Du fait de ces migrations à très larges échelles, une coopération internationale s'est avérée nécessaire pour mutualiser et coordonner les efforts et les recherches en matière de préservation de la biodiversité. Dans ces conditions, la Convention de Bonn (Convention on the Conservation of Migratory Species, CMS) a été instaurée au début des années 80.

Parmi les quelques 11 000 espèces d'oiseaux décrites aujourd'hui dans le monde, près de 2000 présentent un caractère de migrateur, à minima partiellement (Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage, 2021). On estime que cette migration est d'ailleurs effectuée de nuit pour plus de deux tiers d'entre-elles (Réseau Migration, 2023). Dans le contexte actuel de changement climatique, de nouvelles tendances sont néanmoins décelables de manière globale et impactent la migration de l'avifaune à différentes échelles (temporelle, géographique). En résulte plusieurs réponses écologiques : certains individus et/ou populations qui présentaient autrefois un caractère migrateur sont amenés à se sédentariser : c'est notamment le cas de la Fauvette à tête noire ou de la Cigogne blanche (LPO Alsace, 2020). À l'échelle locale, les dates de migration prénuptiales ont

tendances à être plus précoces pour certaines espèces d'oiseaux, bien que ces valeurs ne soient pas uniformes (Bussière, 2016). Les distances de migrations sont également impactées et tendent à s'amenuiser en fonction de l'augmentation des températures (E. VISSER, C. PERDECK, & H. VAN, 2009).

La majorité de ces études s'appuient sur des données récoltées sous protocoles d'échantillonnages diurnes. De ce fait, la connaissance des mœurs nocturnes de l'avifaune est primordiale pour une meilleure prise en compte de ce taxon et donc, *in fine*, une meilleure protection.

### 1.1 Développement de projets EnR et biodiversité

Les énergies éoliennes et photovoltaïques en France font partie des sources d'énergie renouvelable qui connaissent actuellement une accélération significative de leur développement et dans leur déploiement. La production d'électricité par le biais de ces deux sources suit logiquement la même dynamique, se rapprochant d'une croissance exponentielle (Figure 1).

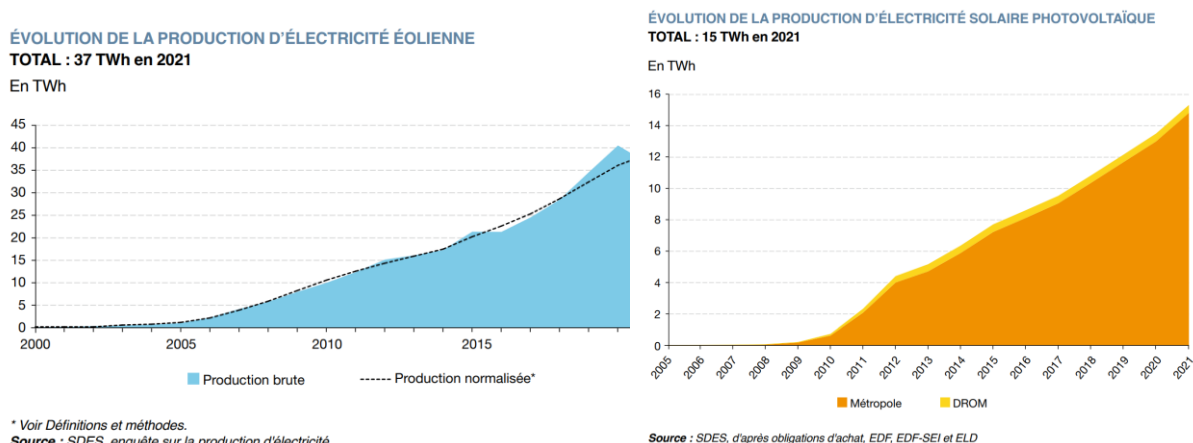


Figure 1 : Evolution de la production d'électricité éolienne et photovoltaïque en France (Service des données et des études statistiques, 2022)

Le développement et la démocratisation à grande échelle de ces modes de production ne sont pas sans conséquences pour la biodiversité. Pour l'énergie éolienne, plusieurs impacts négatifs sont déjà identifiés dans la littérature scientifique. Ainsi, pour l'avifaune et les chiroptères, la perturbation des voies migratoires à plus ou moins large échelle s'ajoute aux divers risques de collisions (Gasparatos, N.H. Doll, Esteban, Ahmed, & A. Olang, 2016).

Dans le contexte de l'énergie photovoltaïque, plusieurs impacts sont également décrits. Parmi eux, et pour les impacts ne concernant que les oiseaux et les chiroptères, on peut citer la perte ou la fragmentation d'habitats, ainsi que les collisions aviaires avec les structures photovoltaïques. Les oiseaux exposés aux flux solaires intenses peuvent subir des

brûlures entraînant potentiellement la mort de milliers d'individus. Enfin, les installations photovoltaïques peuvent perturber les écosystèmes en attirant et en désorientant les oiseaux avec une lumière intense ou polarisée, pouvant agir comme un piège écologique (Gasparatos, N.H. Doll, Esteban, Ahmed, & A. Olang, 2016).

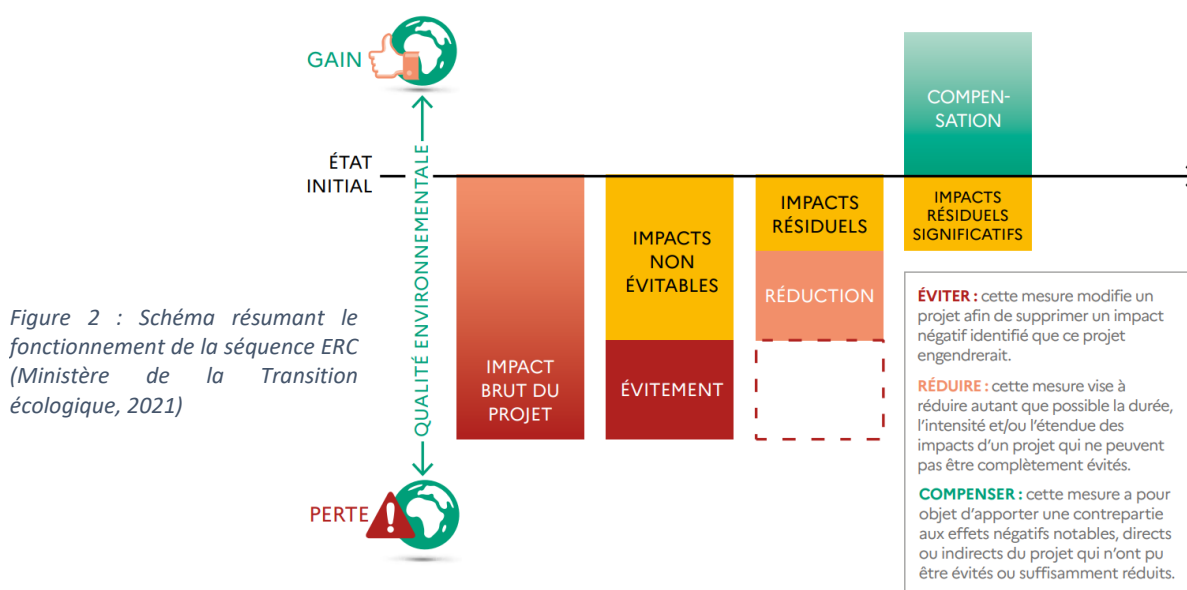
Bien que de nombreuses études soient encore en cours d'élaboration à l'heure actuelle afin de déterminer avec précision l'emprise de ces effets néfastes, il est nécessaire de les prendre déjà en compte pour limiter l'érosion des taxons les plus impactés.

Plusieurs solutions sont actuellement testées dans cette optique, dans le cadre de projets éoliens : c'est notamment le cas des mesures de bridages. Ces dernières consistent en la diminution voir à l'arrêt complet du fonctionnement des parcs éoliens en fonction de différents critères. À l'heure actuelle, ces solutions sont principalement mises en œuvre en contexte agricole, où les mesures de bridage sont étroitement liées aux périodes de fauche des cultures. Bien qu'à l'heure actuelle les données soient insuffisantes pour conclure à un effet significatif de ces mesures sur l'avifaune, il est possible d'entrevoir de nombreuses avancées dans ce sens en faveur de la biodiversité dans les prochaines années (CPIE Sud-Champagne, Boralex, Ecosphère, 2021).

## 1.2 Prise en compte de la migration nocturne de l'avifaune pour un bureau d'études

### 1.2.1 Etude d'impact et séquence ERC

La réalisation de ce travail intervient à titre expérimental au sein du volet biodiversité d'une étude d'impact pour un projet photovoltaïque dans le contexte de la séquence Eviter, Réduire, Compenser (Figure 2).



Ce dispositif s'intègre dans une démarche plus globale de l'Etat français, ayant pour objectif la conciliation de la protection des milieux naturels et de l'aménagement des territoires (Ministère de la Transition écologique, 2021). La séquence ERC intervient donc dans l'ensemble des projets d'aménagements impliquant un impact plus ou moins important sur un milieu naturel, et étant donc soumis à une étude environnementale.

À l'heure actuelle, la mise en place d'un projet d'énergie renouvelable se décompose en plusieurs étapes. D'abord, le porteur de projet va définir son projet qualitativement (type de projet, zone d'implantation) et quantitativement (nombre de machines pour un projet éolien/photovoltaïque, emprise de ce dernier). Par la suite, il va prendre contact avec un ou plusieurs bureaux d'études afin d'évaluer la faisabilité de l'ensemble du projet sous toutes ses formes. L'étude d'impact résulte de l'analyse des données issues de la bibliographie disponible (bases de données, inventaires déjà menés sur la zone potentielle d'implantation du projet) et des données récoltées par le bureau d'études lui-même, mises en perspectives avec le projet EnR. Elle prend en compte la présence sur site et sur une plus large zone des espèces faunistiques ou floristiques, en mettant particulièrement l'accent sur les espèces à forte valeur patrimoniale. Une espèce est considérée comme patrimoniale à partir du moment où elle répond à différents critères, liés principalement à ses classements réglementaires (espèce déterminante ZNIEFF, classement Natura2000...).

L'aspect temporel est une composante centrale de ces études. En effet, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des saisons pour obtenir la vision la plus large possible du rôle écologique que tient le site. En prenant pour exemple l'avifaune, ce sont aussi bien les périodes migratoires que les périodes d'occupation du site (hivernage, nidification) qui sont analysées (Figure 3).

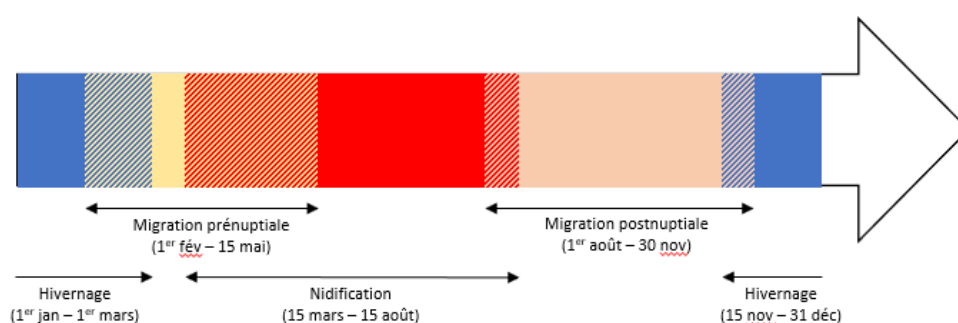


Figure 3 : Périodes de prospections pour l'avifaune dans le cadre d'une étude d'impacts (NCA Environnement, 2023)

Est également pris en compte la présence sur le site d'habitats et de cortèges écologiques particuliers. L'objectif final de ce cheminement systémique est de dresser un état des lieux qui se veut exhaustif du site d'implantation sur le plan écologique, afin de déterminer

les impacts potentiels sur les espèces et les habitats. Des recommandations sont alors données quant à la mise en place et à l'utilisation de la séquence ERC. Une fois l'ensemble de ces étapes effectuées, le dossier est transmis aux services compétents de l'Etat, qui doit statuer sur la viabilité du projet sous toutes ses formes, en prenant en compte l'avis du comité scientifique (CSRPN et/ou CNPN).

La durée de l'ensemble de ce processus est variable car dépendant de la nature d'un projet, du contexte du site pressenti pour son implantation et de la réactivité de l'ensemble des parties prenantes. Plusieurs années sont souvent nécessaires pour mener l'étude du début à la fin, notamment pour les raisons de suivi temporel de la biodiversité évoquées précédemment.

### ***1.2.2 Migration nocturne et bureau d'études***

S'il n'existe à ce jour aucune obligation d'étude de l'avifaune migratrice nocturne dans le cadre des études d'impact, il semblerait que la mise en place de cette méthodologie nouvelle permettrait une meilleure prise en compte de la phénologie de cette dernière. L'apport conséquent de données (aussi bien d'abondance que de richesse spécifique) représente également une possibilité supplémentaire d'affiner les prédictions d'utilisation de l'habitat par ces espèces. De plus, les méthodes bioacoustiques appliquées à l'avifaune migrant de nuit offrent la possibilité de contacter des espèces farouches, peu détectées lors des campagnes de suivis diurnes et parfois rarissimes à l'échelle d'un territoire (WROZA & ROCHEFORT, 2021). Enfin, une suite logique de l'évolution de la réglementation pourrait être la prise en compte obligatoire et systématique de l'avifaune migratrice de nuit par l'intermédiaire de méthodes bioacoustiques dans le cadre d'études environnementales.

En résumé, la méthodologie développée ci-après, bien que présentant des limites, permet une pression « d'observation » inégalée, et bien supérieure à l'ensemble des protocoles utilisés aujourd'hui. L'étude menée ici s'inscrit donc dans une volonté globale de l'entreprise NCA Environnement d'accroître son champ de connaissances et de compétences.

## **1.3 Etat des lieux des méthodes actuellement utilisées pour le suivi de la migration nocturne de l'avifaune**

À l'heure actuelle, seul un nombre restreint de méthodes permettent le suivi de la migration nocturne de l'avifaune :

- Par radar
- Par baguage
- Par écoute acoustique

Chacune de ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients et/ou des limites. Le suivi radar est une méthode relativement fiable, permettant la détection des grands mouvements migratoires sur une amplitude inégalée. En revanche, sa mise en place nécessite d'importants moyens financiers, techniques et humains. De plus, cette méthode ne permet pas d'apporter une approche qualitative de la migration (identification des individus espèce par espèce). Il est uniquement possible d'entrevoir l'aspect quantitatif par le suivi des flux. De plus, au-delà du coût important de ce type de matériel, les radars météorologiques sont dans la plupart des cas fixes, ce qui limite grandement les possibilités de suivis sur de nouveaux sites ou à une échelle plus locale.

Les suivis par baguage s'effectuent par des bagueurs qualifiés et diplômés. Cette méthode permet en plus d'acquérir des données biométriques (CRBPO, 2023). Néanmoins, elle présente des limites inhérentes à son fonctionnement, c'est-à-dire nécessitant d'importants moyens humains, avec la présence à chaque session de personnes qualifiées. De plus, seuls les oiseaux migrant à basse altitude sont susceptibles d'être capturés.

C'est la méthode du suivi par écoute acoustique qui sera utilisée et développée par la suite dans le cadre de cette étude. L'avantage en termes de flexibilité surpasse de loin les deux autres méthodes. En effet, cette dernière ne nécessite que peu de matériel, et peut également faire appel à de nombreux participants partout dans le monde dans le cadre des sciences participatives. Cette méthode repose sur l'émission de Nocturnal Flights Calls (NFC) par les oiseaux migrateurs. Ces cris sont émis à intervalle plus ou moins régulier par les oiseaux durant leurs déplacements. Ainsi, si le fait de capter un contact sonore (hors sons parasites) signifie qu'un oiseau est passé au-dessus du détecteur, la réciproque est loin d'être vraie. On peut alors aisément imaginer le nombre d'individus passant au-dessus des enregistreurs sans pour autant n'être jamais contactés (WROZA & ROCHEFORT, 2021).

#### **1.4 Problématique et fil directeur**

Cette étude a pour objectif principal l'analyse bioacoustique de l'ensemble des nuits qui constituent la période de migration prénuptiales de l'avifaune du Paléarctique occidental (1<sup>er</sup> février – 15 mai) sur un site d'étude photovoltaïque porté par la société NCA Environnement (volet Etude environnementale). L'objectif sous-jacent réside dans l'évaluation critique de la méthodologie propre au suivi de la migration nocturne développée en interne, afin d'en connaître les apports, les limites et les améliorations possibles. La confrontation des résultats obtenues vis-à-vis des différents paramètres abiotiques observés durant la durée du suivi sera également détaillée, afin d'affiner la méthodologie, le traitement et l'interprétation des données.

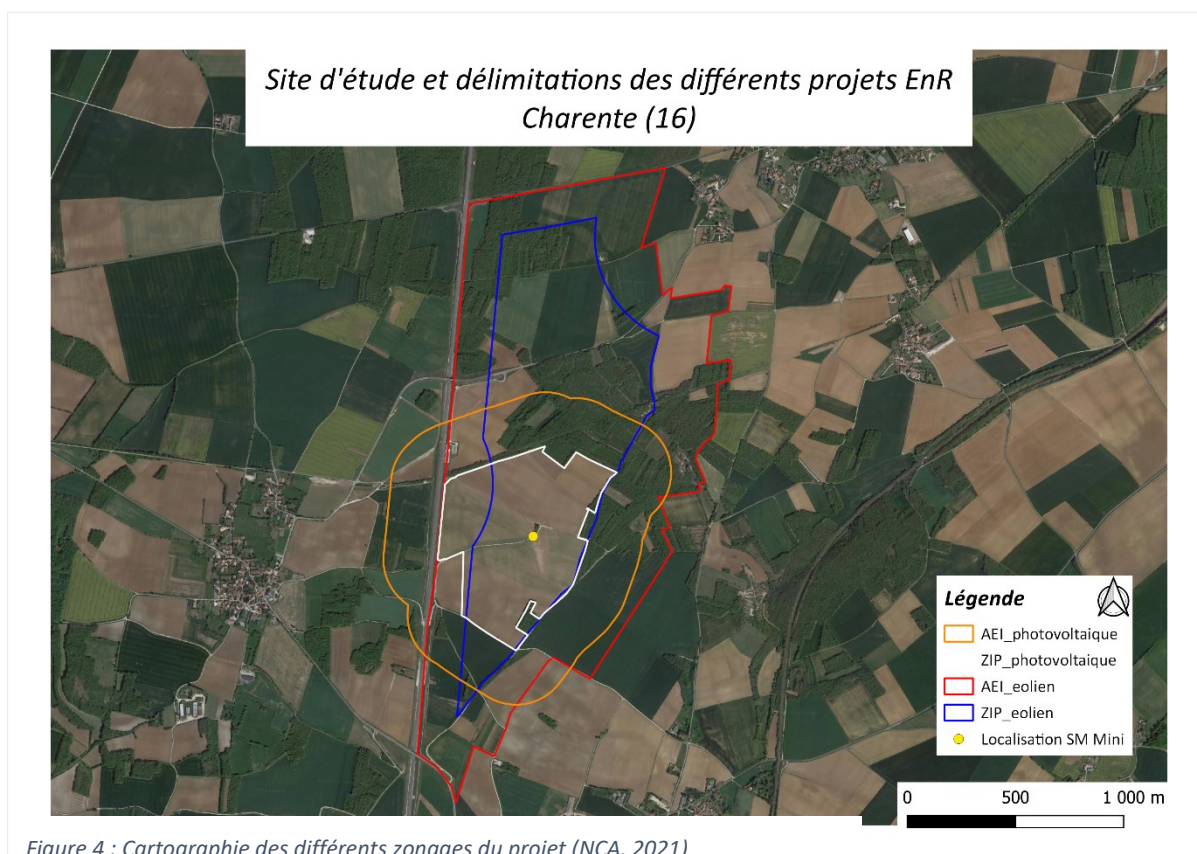
Pour ce faire, plusieurs hypothèses peuvent être formulées. Au regard des données qui vont être récoltées, existe-t-il plusieurs communautés de migrants ? Et dans quelles mesures les données météorologiques influencent-elles ces communautés ?

## 2. MATERIEL ET METHODE

### 2.1 Site d'étude

Le site qui fait l'objet de cette étude se situe au nord du département de la Charente (16), à proximité des départements de la Vienne (86) et des Deux-Sèvres (79). Sur ce dernier, un projet de mise en place d'un parc photovoltaïque est actuellement à l'étude, en phase initiale. Le bureau d'études NCA Environnement a été choisi pour réaliser le volet environnemental de cette étude d'impact. Pour des raisons de confidentialité vis-à-vis du porteur de projet, la localisation exacte du site ne peut être divulguée.

La Zone d'Implantation Potentielle (ZIP) du projet s'étend sur une surface d'environ 42 hectares, au cœur d'un vallon composé principalement de zones agricoles cultivées et de boisements (NCA, 2021). L'Aire d'Etude Immédiate (AEI), qui se définit comme une zone comprenant la ZIP en plus de l'ensemble des zonages pouvant être impactés par le projet sur le plan de la biodiversité et des habitats, fait quant à elle 58 hectares au total.



Il est aussi important de préciser que ce site est également sous l’emprise d’un projet éolien à proximité, avec une ZIP de 112 hectares (Figure 4). La Ligne Grande Vitesse (LGV) traverse également le site d’études.

L’étude d’impact prend en compte la présence de différents zonages écologiques à proximité des zones d’implantation : une Zone Naturelle d’Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de type 1 ainsi qu’une Zone de Protection Spéciale (ZPS) pour la protection des oiseaux de plaines. Parmi les enjeux déjà explicités par l’intermédiaire des données bibliographiques, certaines espèces à caractère patrimoniale peuvent être décrites, en période migratoire mais aussi en nidification, la principale étant l’Outarde canepetière (*Tetrax tetrax*). Les espèces qui viennent s’y ajouter sont les grands rapaces de plaines (Busard Saint-Martin, Busard cendré, Busard des roseaux), certains limicoles terrestres (Œdicnème criard, Vanneaux huppés), plusieurs espèces de passereaux (Engoulevent d’Europe, Gorgebleue à miroir, Pipit rousseline, Pie-grièche écorcheur, Bruant ortolan) ou encore quelques échassiers (Cigogne blanche, Grue cendrée) (INPN, 2017).

## **2.2 Période d’échantillonnage**

La période d’échantillonnage utilisée ici se calque sur les périodes de migration de l’avifaune telles que définies dans la littérature scientifique. Les deux périodes migratoires principales sont donc la période de migration pré-nuptiale, du 1<sup>er</sup> février au 15 mai, et la période de migration post-nuptiale, du 1<sup>er</sup> août au 30 novembre (WROZA & ROCHEFORT, 2021). Dans le cadre de cette étude, seule la migration pré-nuptiale sera analysée.

La tranche horaire pour l’enregistrement de la migration nocturne s’étale du crépuscule civil à l’aube civile. Cette période est délimitée par la position du soleil par rapport à l’horizon, soit à 6° minimum. Il est alors impossible d’identifier un oiseau visuellement : on peut donc considérer que chaque oiseau effectue un vol nocturne, de manière locale ou migratoire (WROZA & ROCHEFORT, 2021). Les informations relatives aux crépuscule civil et à l’aube civile sont disponibles à partir de cette adresse internet : <https://dateandtime.info/fr/citysunrisesunset.php>. Les données étant sensiblement variables en fonction de la localisation, la ville de Poitiers sera choisie comme la référence.

## **2.3 Matériel de captation**

### **2.3.1 Choix des enregistreurs**

Il existe à l’heure actuelle une multitude d’enregistreurs pouvant être utilisés dans le cadre du suivi de la migration nocturne. Le choix du matériel d’enregistrement est loin d’être anodin : en effet, il déterminera, au moins en partie, la qualité et la quantité de données récoltées, en fonction de la sensibilité de ce dernier. L’enregistreur devra être autonome une

fois configuré, avec une bonne résistance aux aléas météorologiques (vent de forte intensité, pluie, température). L'étanchéité est un prérequis obligatoire. De plus, du fait de l'éloignement du site d'études et afin de limiter les déplacements, le matériel doit disposer d'une autonomie (batteries et cartes SD) autorisant l'enregistrement de plusieurs nuits à la suite, de manière automatisée.

À partir de l'ensemble des éléments énoncés précédemment, le choix de l'enregistreur s'est tourné vers le SM Mini de la société Wildlife Acoustic. Cet enregistreur compact dispose de deux microphones omnidirectionnels permettant l'enregistrement dans le spectre de l'audible, avec une qualité équivalente aux enregistreurs plus haut de gamme de la même marque (SM4) (WILDLIFE ACOUSTIC, 2023). Il a déjà fait ses preuves dans de nombreuses utilisations et études scientifiques en biologie et écologie acoustique, notamment pour l'avifaune (TRABA & PEREZ-GRANADOS, 2021). Le SM Mini dispose d'une autonomie d'une dizaine de nuits (sans l'ajout d'aucun module complémentaire), permettant donc une bonne flexibilité dans l'organisation des passages de changements de piles et cartes SD. De plus, sa facilité de déploiement (Figure 5) et de paramétrage directement sur le terrain par l'intermédiaire d'une application pour smartphone rend son utilisation idéale dans le cadre d'un usage en bureau d'études.

Du fait de la faible superficie de la zone de prospection et afin d'éviter tout risque de double détection, un seul enregistreur a été déployé au sein de la ZIP, en bordure du bosquet central (Figure 4).



Figure 5 : Enregistreur SM Mini opérationnel (Gravador Song Meter Mini)

### 2.3.2 Paramétrage de l'enregistreur

Le paramétrage de l'appareil est réalisé à partir du protocole d'enregistrement défini par NCA Environnement, qui s'appuie sur les dernières données bibliographiques disponibles et les préconisations de Wildlife Acoustic. Par l'intermédiaire de l'application (iOS/Android), il est possible de modifier les paramètres suivants :

- **Taux d'échantillonnage**, qui correspond au nombre d'échantillons par seconde d'un son (Fréquence d'échantillonnage et Bit Depth, 2023). Plus cette valeur est élevée, plus l'enregistrement contiendra de fréquences à hautes émissions. Ainsi, cette valeur est à mettre en perspective avec l'utilisation des données qui va en être faite. Dans le cadre de l'enregistrement de cris d'oiseaux, il est rare d'observer des émissions au-delà de 12 000 Hz (12 kHz). La captation des sons variant d'un facteur 2 par rapport à la fréquence d'échantillonnage, la valeur de 24 000 Hz (24 kHz) a été retenue pour l'enregistrement.
- **Longueur maximale d'enregistrement** : cette dernière est réglée sur la valeur maximum proposée par le SM Mini, à savoir 60 minutes par enregistrement. Une nuit est donc composée de 14 enregistrements d'une heure chacun (de 18h à 8h).
- **Canal** : réglé sur stéréo, pour bénéficier de tout le potentiel proposé par les deux microphones.
- **Gain** : ce réglage ne doit pas être sous-estimé car il représente un compromis entre la qualité de l'enregistrement et la facilité d'identification des espèces contactées. Une trop forte augmentation du gain entraînant une saturation du sonogramme et *in fine* une perte d'information visuelle, il est préférable d'utiliser une valeur intermédiaire parmi celles proposées (6, 12, 18, 24 dB). Cette valeur est donc réglée sur 18 pour les deux canaux d'enregistrement.
- Vérification des données de **localisation** et de **fuseau horaire**.

Le suivi régulier des enregistreurs et de leur contenu étant un prérequis pour l'acquisition régulière et sans coupures des données, il a été décidé d'effectuer un passage régulier (tous les 12 jours +/-) sur site pour effectuer les changements des piles et des cartes SD.

## 2.4 Traitement des données acoustiques

### 2.4.1 Logiciel de traitement

Une fois les données importées sur le serveur commun au secteur Milieu Naturel, il est possible de commencer le traitement des fichiers WAV, par l'intermédiaire du logiciel Audacity. Avec le logiciel Kaleidoscope, ce sont les deux principaux logiciels utilisés pour le suivi de la migration nocturne de l'avifaune. Les deux présentent des avantages et des inconvénients, mais le choix s'est effectivement porté sur Audacity pour sa simplicité

d'utilisation. Les paramètres utilisés dans ce logiciel sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 1), et suivent les recommandations du livre « La migration nocturne par le son » (WROZA & ROCHEFORT, 2021).

| MENU                                | SOUS-MENU                   | PARAMETRE         |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| <b>PREFERENCES : PISTES</b>         | Mode d'affichage par défaut | Spectrogramme     |
|                                     | Echelle                     | Linéaire          |
| <b>PREFERENCES : SPECTROGRAMMES</b> | Fréquence minimum (Hz)      | 500               |
|                                     | Fréquence maximum (Hz)      | 11000             |
|                                     | Gain (dB)                   | 20                |
|                                     | Plage (dB)                  | 80                |
|                                     | Rehausser haut (dB/dec)     | 10                |
|                                     | Schéma                      | Niveau de gris    |
|                                     | Taille de fenêtre (s)       | 1024 – par défaut |

Tableau 1 : Paramètres Audacity

À noter que, dans le cadre de l'ensemble des écoutes, un pas de temps de 1 minute a été utilisé, ce qui représente un bon compromis entre lisibilité du sonogrammes, détectabilité des sons et efficacité de traitement (Figure 6).

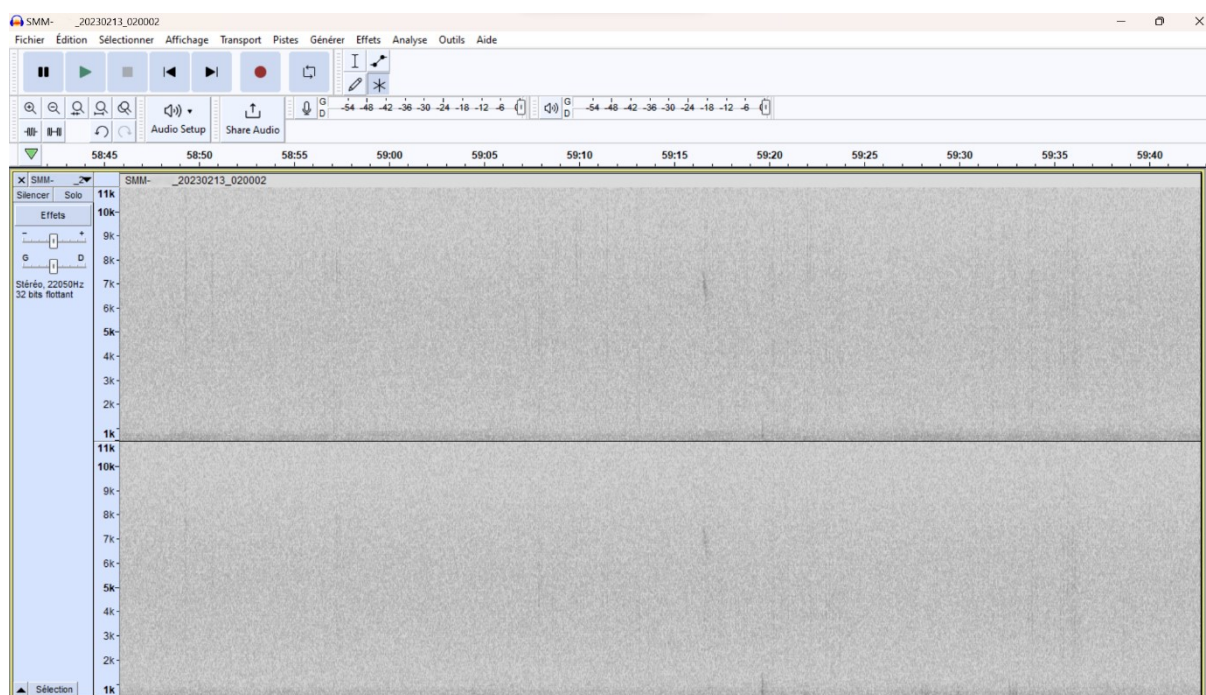


Figure 6 : Interface d'Audacity pour le traitement des nuits d'enregistrement

### 2.4.2 Méthode d'identification

C'est la fusion de l'aspect visuel et auditif qui permet la détection et l'identification des espèces de passage : d'abord, les contacts auditifs sont repérés par l'intermédiaire du sonogramme. Une première écoute est alors effectuée, permettant l'identification à l'oreille de l'individu. La vérification visuelle permet de confirmer cette identification grâce à la forme du son (propre à chaque espèce) représentée sur le sonogramme. Si, par ailleurs, l'identification n'a pas été rendue possible grâce au son et au sonogramme, des recherches sont effectuées pour réussir à identifier le ou les individus contacté(s). Les enregistrements qui malgré les recherches restent non-identifiés sont notés « indéterminés ».

Une base de données a largement été utilisée tout au long de cette étude : il s'agit du site Xeno-Canto. Ce site internet collaboratif permet la libre diffusion et consultation des centaines de milliers d'enregistrements de la faune du monde entier (XENO-CANTO, 2023). Bien que le taxon phare soit l'avifaune, des collections sur les orthoptères et les chauves-souris sont également accessibles. Grâce à cet outil, il est alors possible d'effectuer de multiples comparaisons des échantillons sonores récoltés pour affiner les identifications, avec les sonogrammes et les enregistrements sonores.

### 2.4.3 Archivage des données récoltées

Une fois l'identification confirmée, les enregistrements audios sont exportés (d'une dizaine de secondes pour les cris les plus brefs, environ 5 secondes avant et après le cri) et les données relatives à ce dernier sont compilées dans un tableau Excel. Ainsi, on retrouve les colonnes suivantes (Tableau 2) :

| NOM DE COLONNE       | CONTENU                                                       | EXEMPLE                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|
| NOM_FICHIER          | Nom du fichier audio exporté                                  | SMM02_20230201_183517   |
| PERIODE              | Période migratoire (pré ou postnuptiale)                      | Migration pré-nuptiale  |
| DATE                 | Date de l'enregistrement                                      | 01/02/2023              |
| HEURE                | Heure de l'enregistrement                                     | 183517                  |
| ID_NUIT              | Identifiant par nuit, qui ne change donc pas au-delà de 23h59 | N_01/02/2023-02/02/2023 |
| CREPUSCULE_CIVIL_FIN | Heure de référence de fin d'analyse des enregistrements       | 1834                    |

| NOM DE COLONNE         | CONTENU                                                       | EXEMPLE                  |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------|
| CREPUSCULE_CIVIL_DEBUT | Heure de référence de début d'analyse des enregistrements     | 620                      |
| TRANCHE HORAIRE        | Tranche horaire créée en fonction de la colonne HEURE         | 06h00 - 07h00            |
| NOM_COMMUN             | Nom français de l'espèce contactée                            | Vanneau huppé            |
| NOM_SCIENTIFIQUE       | Nom scientifique de l'espèce contactée                        | <i>Vanellus vanellus</i> |
| NOMBRE_CRIS            | Nombre de cris émis par le/les individu(s) de la même espèce  | 4                        |
| NOMBRE_INDIVIDUS       | Nombre d'individus estimé                                     | 1                        |
| STATUT                 | Statut de l'espèce en fonction de la période de contact       | Migrateur                |
| TYPE_VOCALISE          | Type de vocalise émise par le/les individus de la même espèce | Cri                      |
| COMMENTAIRE            | Commentaire (facultatif)                                      | Enregistrement lointain  |

Tableau 2 : Tableau de compilation et d'archivage des données récoltées en suivi de migration nocturne

## 2.5 Test de détection

Bien que le matériel d'enregistrement choisi dans le cadre de cette étude ait été utilisé de nombreuses fois dans un cadre scientifique à l'échelle internationale, il apparaît important de réaliser nos propres mesures afin de maximiser la précision et donc l'interprétation des données récoltées. Le test de détection intervient dans ce contexte, où l'objectif principal est de prendre la mesure des capacités du matériel d'enregistrement utilisé en fonction de différents paramètres, dans un cadre de migration nocturne. Il permet donc de prendre du recul vis-à-vis des performances de ce dernier tout en complétant les données fournies par le constructeur (Figure 7).

L'ensemble des tests et des résultats détaillés ci-dessous ont été réalisés par Lou-Anh RAVAIN, alternante à NCA Environnement et travaillant également sur le suivi de la migration nocturne, à l'aide des conseils de Thierry LENGAGNE (spécialiste de la communication animale et chercheur au CNRS).

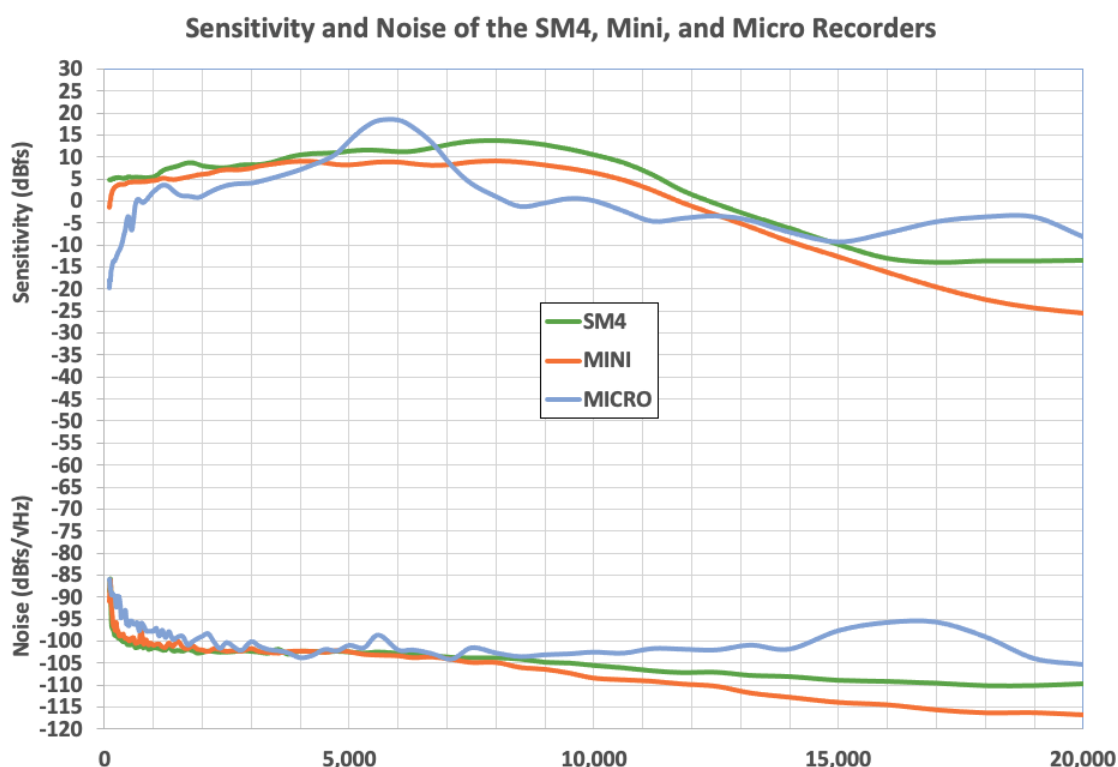


Figure 7 : Courbe de réponse de la sensibilité de différents enregistreurs (WILDLIFE ACOUSTIC, 2023)

Plusieurs variables sont pressenties comme pouvant influencer les performances de captation acoustique : d'abord, la distance entre le SM Mini (récepteur) et l'oiseau (émetteur). Un oiseau à plus grande distance sera naturellement plus complexe à capter, d'autant plus quand ce dernier est en déplacement, avec une distance potentiellement fortement variable. Le volume sonore est également un facteur d'influence de la capacité de détection. Enfin, la fréquence d'émission doit aussi être prise en compte dans le cadre de ce test.

### 2.5.1 Test de nuit

Pour réaliser le test, une enceinte est utilisée pour simuler l'émetteur (oiseau), plusieurs SM Mini sont utilisés en tant que récepteur, et le niveau sonore est déterminé précisément à l'aide d'un sonomètre. Plusieurs séquences de sons ont été choisies, dans l'objectif de tester la gamme de fréquence d'émission la plus large possible vis-à-vis des espèces susceptibles d'être contactées. Ainsi, les fréquences graves sont représentées par deux espèces d'Ardéidés (Bihoreau gris et Héron cendré : entre 1,5 et 2,5 kHz), les fréquences aiguës par des Turdidés (Grive musicienne et Grive mauvis : entre 7 et 11 kHz) et les fréquences intermédiaires par deux espèces de passereaux (Alouette des champs et Bruant ortolan : entre 3 et 6,5 kHz).

Les enregistrements ont ensuite été diffusés à 10 reprises, à 70, 80 et 90 décibels. Afin de mesurer précisément le niveau sonore émis, l'enceinte est placée à 1 mètre du sonomètre. Le test est effectué sur une plaine agricole (milieu ouvert) sans obstacles, dans de bonnes conditions météorologiques (absence de vent ou de pluies), afin de reproduire les conditions idéales d'enregistrement nocturne. Il est à noter que les conditions sonores ont été perturbées par des bruits parasites (orthoptères, Anoures). Les deux SM Mini sont placés à différentes distances (de 50 à 300 mètres) en respectant un transect linéaire.

### **2.5.2 Test de jour**

Les conditions de ce test de jour sont relativement similaires à celles de nuit. La distance entre l'enceinte et les SM Mini a seulement été allongée (entre 250 et 400 mètres) afin d'obtenir davantage de données. Les conditions météorologiques plus dégradées que de nuit ont néanmoins été compensées par la faible présence de bruits parasites (seulement quelques passereaux).

### **2.5.3 Traitement des données obtenues**

Par la suite, les séquences sonores ont été examinées individuellement à l'aide du logiciel Audacity, dans le but d'évaluer l'impact de la distance séparant l'émetteur et le récepteur en fonction de la fréquence et des niveaux sonores des cris. Lorsqu'un cri devient indiscernable sur le spectrogramme, on considère que la distance maximale de détection du SM Mini est atteinte pour un niveau sonore et une fréquence spécifique.

## **2.6 Données météorologiques**

Afin d'étudier l'effet des conditions météorologiques sur la migration nocturne de l'avifaune, il est nécessaire de réaliser une extraction de ces données. C'est par l'intermédiaire du site Meteociel que les données ont pu être récupérées. Afin d'obtenir les mesures météorologiques les plus pertinentes possibles, l'objectif était de trouver une station de mesure la plus proche possible de notre site d'études, avec des données météorologiques non pas à la journée mais à l'heure. C'est finalement la station d'Angoulême – Brie Champnier (16) qui s'est avérée la plus proche à 37,1 km de distance de notre enregistreur (Tableau d'observations pour Angoulême - Brie Champniers (16) ( 132 m ), 2023).

Les données météorologiques ont été récupérées à l'aide de copier-coller à l'échelle d'une heure. Les intitulés des colonnes sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 3) :

| INTITULE       | SIGNIFICATION                                                                                                                         | EXEMPLE                  |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| HEURE LOCALE   | Heure de récolte des données                                                                                                          | 23 h                     |
| NEB.           | Nébulosité du ciel, correspond à la couverture nuageuse                                                                               | 8/8                      |
| VISI           | Visibilité exprimée en km                                                                                                             | 19.9 km                  |
| TEMPERATURE    | Température exprimée en degré Celsius (C°)                                                                                            | 5.2 °C                   |
| HUMI.          | Humidité de l'air, en pourcentage (%)                                                                                                 | 82%                      |
| POINT DE ROSEE | Température à partir de laquelle la rosée se dépose (Point de rosée, 2023) en degré Celsius (°C)                                      | 2.4°C                    |
| HUMIDEX        | Indice d'humidité ressentie par les humains, fortement liée à la chaleur et à l'humidité (Indice humidex et le travail - CCHST, 2023) | 5.2                      |
| WINDCHILL      | Indice de température ressentie par les humains sous l'effet du vent (Tual, 2018)                                                     | 5.8                      |
| VENT (RAFALES) | Mesure de la vitesse du vent et des rafales entre parenthèses, en km/h                                                                | 10 km/h (13 km/h)        |
| PRESSION       | Pression atmosphérique, ou poids de la colonne d'air entre le sol et l'atmosphère (climatologie, 2023) en hectopascals                | 1034.9 hPa<br>1032.8 hPa |
| PRECIP.MM/H    | Précipitations pluviométriques en mm/h                                                                                                | Aucune, 0.2, traces      |

Tableau 3 : Données météorologiques et leur signification

La variable Néb. (nébulosité) n'a pas été prise en compte dans le cadre des analyses statistiques qui vont suivre cette dernière étant assez incomplète dans le remplissage de ses données sur Meteociel. Par ailleurs, certaines variables semblent de suites peu pertinentes à

utiliser dans le cadre de cette étude : c'est notamment le cas des données de Windchill et Humidex. En effet, en plus d'être particulièrement anthropocentrés, ces deux indices sont corrélés à la température et à la vitesse du vent pour l'un, ainsi qu'à la mesure de l'humidité pour l'autre. Une vérification statistique sera donc effectuée afin d'évaluer la pertinence de l'utilisation de ces paramètres.

## **2.7 Analyses statistiques**

L'ensemble des analyses statistiques de ce rapport ont été réalisées à l'aide du logiciel R (4.2.1) sous l'interface R Studio (RStudio Team, 2020).

Les données météorologiques (Tableau 3) ont donc été mises en perspective avec les données issues de l'analyse des nuits en période migratoire. Une fusion des deux bases de données a été réalisée par l'intermédiaire d'Excel pour obtenir un tableau (Annexe 2) représentant le nombre d'individus contactés par heure en fonction des paramètres abiotiques météorologiques. Cette étape est essentielle afin de réaliser une Analyse en Composantes Principales à l'aide du package FactoMineR (Lê, Josse, & Husson, 2008).

Cette analyse multivariée a été choisie en premier lieu car notre jeu de données et ses multiples variables quantitatives s'y prête particulièrement bien. Afin de faciliter l'interprétation des résultats, il est nécessaire de limiter les biais liés à la prise en compte des différentes variables météorologiques. Ainsi, il n'est pas souhaitable de considérer deux variables ou plus qui mesurent le même phénomène. Bien que des relations de corrélations n'induisent pas systématiquement une représentation similaire du phénomène, plusieurs des différentes variables de ce jeu de données sont pressenties comme telles : le vent et les rafales, le vent et l'indice Windchill, l'humidité et l'indice Humidex, la température et point de rosée... Afin de déterminer les coefficients de corrélation de ces variables, la corrélation de Spearman a été utilisée dans le but de confirmer les résultats obtenus par représentation graphique. Un test de PERMANOVA a été réalisé dans l'objectif de vérifier s'il existe une différence significative de l'ensemble de ces données en fonction des mois.

Afin de déterminer s'il existe un effet des mois sur les espèces contactées, une Analyse Factorielle de Correspondance (AFC) a été utilisé sur le nombre d'individus par espèce et par mois, à l'aide du package FactoMineR. Pour ce faire, un tableau de données a été réalisé, avec le nombre de contact par espèce et par nuit (Annexe 3).

Les ellipses présentes sur les graphiques de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) correspondent à des ellipses de confiance. Ces ellipses sont centrées sur le barycentre et indiquent l'intervalle de confiance à 95% pour les valeurs des variables quantitatives analysées. Si les ellipses de différents groupes

ne se superposent pas, cela suggère une potentielle différence statistiquement significative entre ces groupes.

### 3. RESULTATS

#### 3.1 Test de détection

Les différents tests ont révélé que toutes les fréquences, qu'elles soient diffusées à des niveaux sonores de 70, 80 ou 90 dB, sont correctement détectées par le SM Mini jusqu'à une distance de 200 mètres (Tableau 2). Au-delà de cette distance, la détection est rendue particulièrement complexe, tendance qui se vérifie principalement sur les fréquences extrêmes (les plus basses et les plus élevées). Cette tendance devient plus marquée lorsque le volume sonore s'affaiblit. À partir d'une distance de 350 mètres, aucune séquence sonore n'a été enregistrée par le SM Mini au cours des essais réalisés de jour (Tableau 5).

|      | 70dB         |              |              | 80dB         |              |              | 85dB         |              |              |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|      | Fq basse     | Fq moyenne   | Fq haute     | Fq basse     | Fq moyenne   | Fq haute     | Fq basse     | Fq moyenne   | Fq haute     |
| 50m  | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>9/10</b>  | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> |
| 200m | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>9/10</b>  | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> |
| 250m | 0/10         | 7/10         | 5/10         | 0/10         | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> | 4/10         | <b>10/10</b> | <b>10/10</b> |
| 300m | 0/10         | 0/10         | 0/10         | 0/10         | <b>8/10</b>  | 0/10         | 2/10         | <b>9/10</b>  | 0/10         |

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus lors du test de détection de nuit

|      | 70dB     |            |          | 80dB     |            |          | 85dB        |             |          |
|------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|-------------|-------------|----------|
|      | Fq basse | Fq moyenne | Fq haute | Fq basse | Fq moyenne | Fq haute | Fq basse    | Fq moyenne  | Fq haute |
| 250m | 0/10     | 0/10       | 0/10     | 6/10     | 7/10       | 0/10     | <b>9/10</b> | <b>8/10</b> | 0/10     |
| 300m | 0/10     | 0/10       | 0/10     | 0/10     | 0/10       | 0/10     | 6/10        | 6/10        | 0/10     |
| 350m | 0/10     | 0/10       | 0/10     | 0/10     | 0/10       | 0/10     | 0/10        | 0/10        | 0/10     |
| 400m | 0/10     | 0/10       | 0/10     | 0/10     | 0/10       | 0/10     | 0/10        | 0/10        | 0/10     |

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus lors du test de détection de jour

### 3.2 Prospections nocturnes

Au total, 2601 contacts ont été enregistrés sur l'ensemble des 104 nuits d'écoute de la période pré-nuptiale sur le site d'étude (Figure 8). Il est important de mentionner que parmi ces 104 nuits, 10 n'ont pas pu être enregistrées du fait de problème matériel.

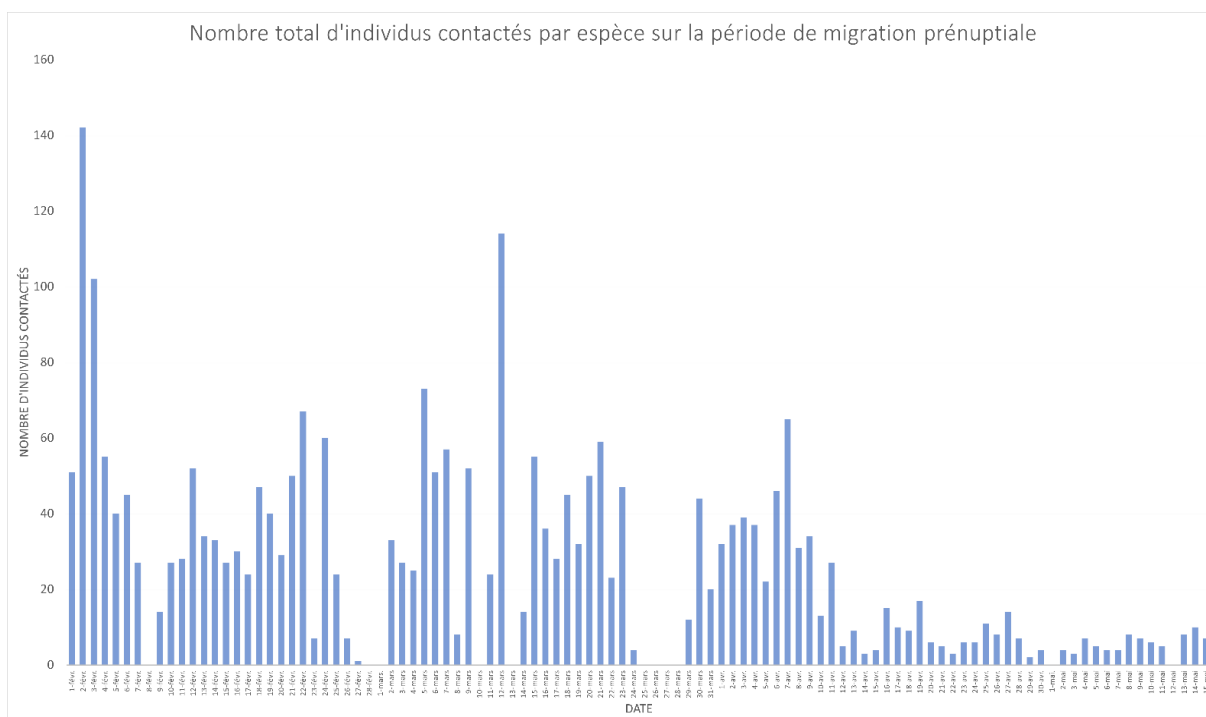


Figure 8 : Diagramme représentant le nombre d'individus contactés pour chaque nuit sur l'ensemble de la période migratoire pré-nuptiale

Sur les 4 mois de migration pré-nuptiale, les individus considérés comme migrants sont très largement majoritaires (1939 individus migrants contre 662 individus locaux), à l'exception du mois du mai, qui pourrait correspondre à la

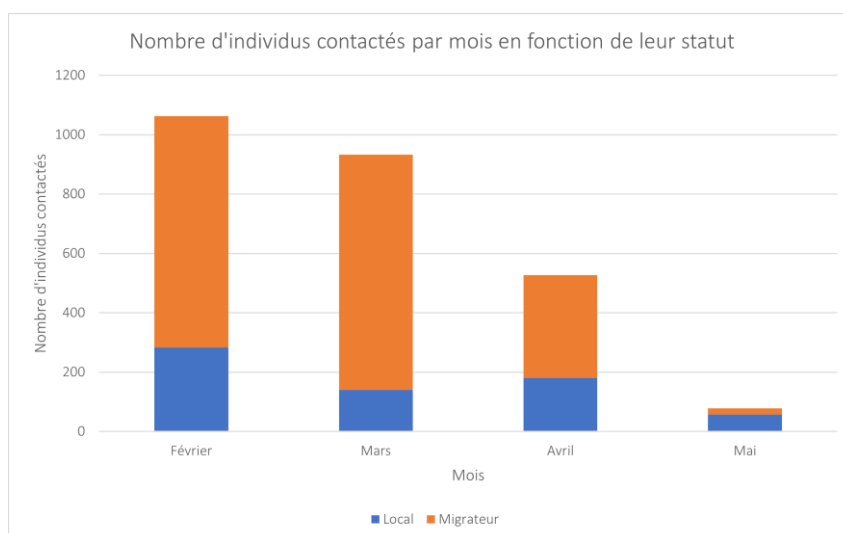


Figure 9 : Nombre d'individus contactés par mois en fonction de leur statut

diminution des flux migratoires (Figure 9). Le mois de février, qui correspond normalement au début de la période de migration pré-nuptiale est néanmoins le mois avec le plus d'individus contactés. Cela peut

s'expliquer par l'afflux important d'espèces migrants en grands groupes (Grue cendrée par exemple), avec donc la présence de valeurs extrêmes.

39 espèces différentes ont été contactées (Annexe 1) dont 23 espèces nouvelles, c'est-à-dire qui n'avaient pas été contactées sur le site durant les prospections diurnes en période de migration pré-nuptiale. Les 5 espèces les plus contactées en nocturne représentent plus de 63% du nombre de contacts total, et les 15 premières plus de 94% de l'ensemble des contacts (Figure 10).

Parmi les 15 espèces les plus abondantes, plusieurs espèces sédentaires sont présentes en grand nombre : c'est notamment le cas des rapaces nocturnes (dans l'ordre, Effraie des clochers, Chevêche d'Athéna et Chouette hulotte). Les Turridés dominent également les premières places (Merle noir, Grive mauvis, Grive musicienne), mais sont quant à eux migrants (à l'exception du merle noir).

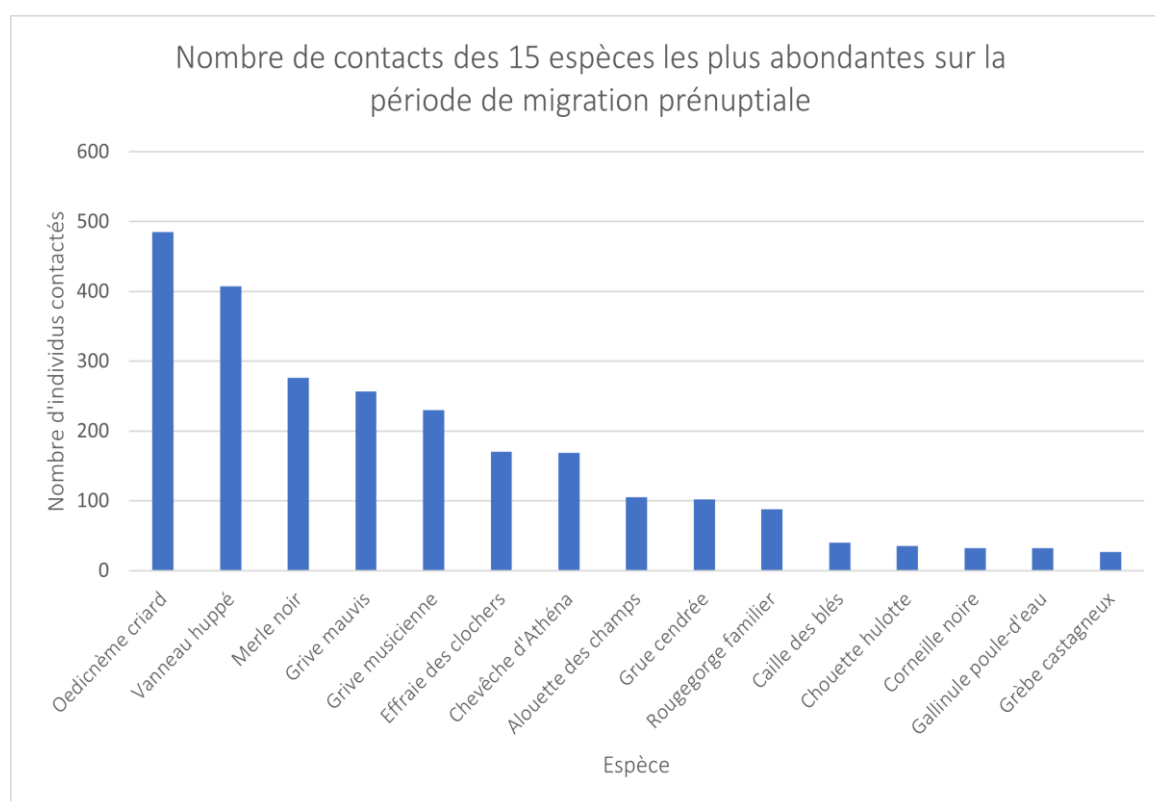


Figure 10 : Nombre de contacts des 15 espèces les plus abondantes sur la période de migration pré-nuptiale (nocturne)

### 3.3 Analyses statistiques

#### 3.3.1 Analyse des Composantes principales

Par lecture graphique (Figure 12), il est possible de lire une forte corrélation positive entre le « Vent » et les « Rafales » (en km/h) ( $R^2 = 0.86$ ) ainsi que pour la « Température » (en °C) et les indices « Windchill » ( $R^2 = 0.97$ ) et « Humidex » ( $R^2 = 0.98$ ). Ces deux indices sont d'ailleurs fortement corrélés entre eux ( $R^2 = 0.95$ ), ils seront donc exclus de l'ACP. Nous retrouvons également une corrélation négative entre la « Visibilité » (en km) et « Humidité » en % ( $R^2 = 0.27$ ), c'est la raison pour laquelle

cette dernière variable sera écartée. Il est à noter que la variable « Nombre de contacts par heure » (comprendre nombre d'individus) ne montre graphiquement que peu de corrélation avec les variables abiotiques.

Les résultats de l'ACP sur les 6 variables sélectionnées (Figure 11) indiquent que les deux premières dimensions expliquent 53% de l'inertie des données. Les pourcentages de variance expliquée par les dimensions 3, 4,

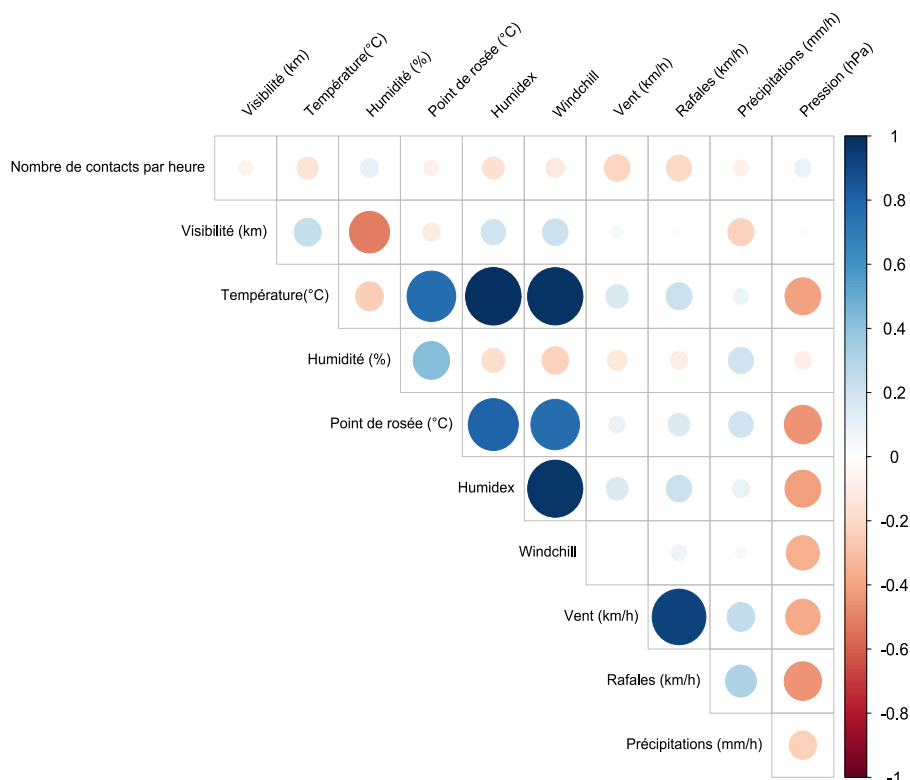


Figure 12 : Représentation des coefficients de corrélations des différentes variables météorologiques en fonction du nombre de contacts d'oiseaux

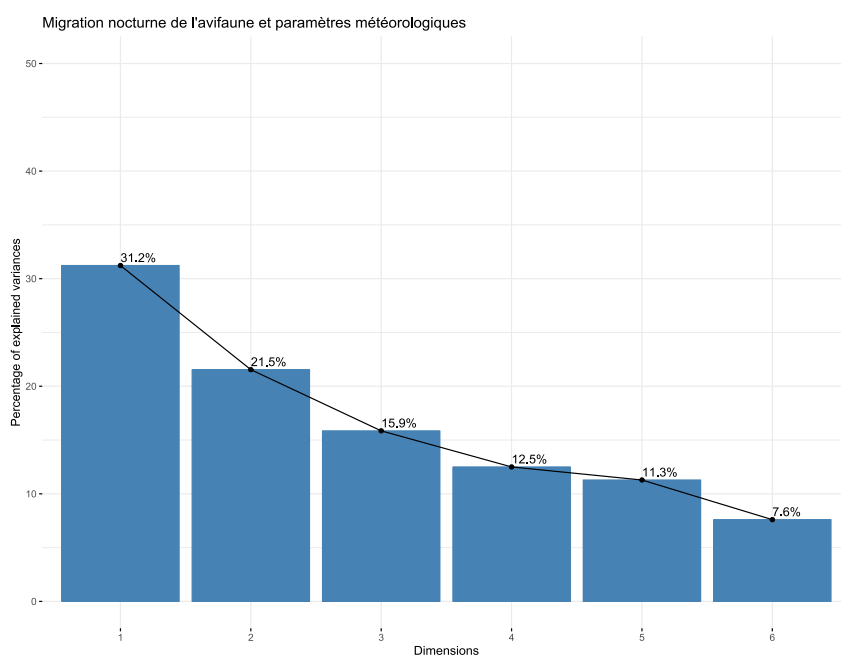


Figure 11 : Représentation graphique des valeurs propres (valeur égale au pourcentage de variance expliquée) de chacune des dimensions créées par l'ACP pour la migration nocturne de l'avifaune et les paramètres météorologiques

5 et 6 ne sont pas négligeables. Il est donc nécessaire d'observer la projection de ces axes, par exemple sur l'axe F1-F3.

Les plans F1-F2 et F1-F3 formant des groupes similaires, seuls les axes F1-F2 seront représentés ici. En projetant les paramètres abiotiques sur le plan formé par les différentes dimensions, on obtient le graphique d'ACP ci-dessous (Figure 13).

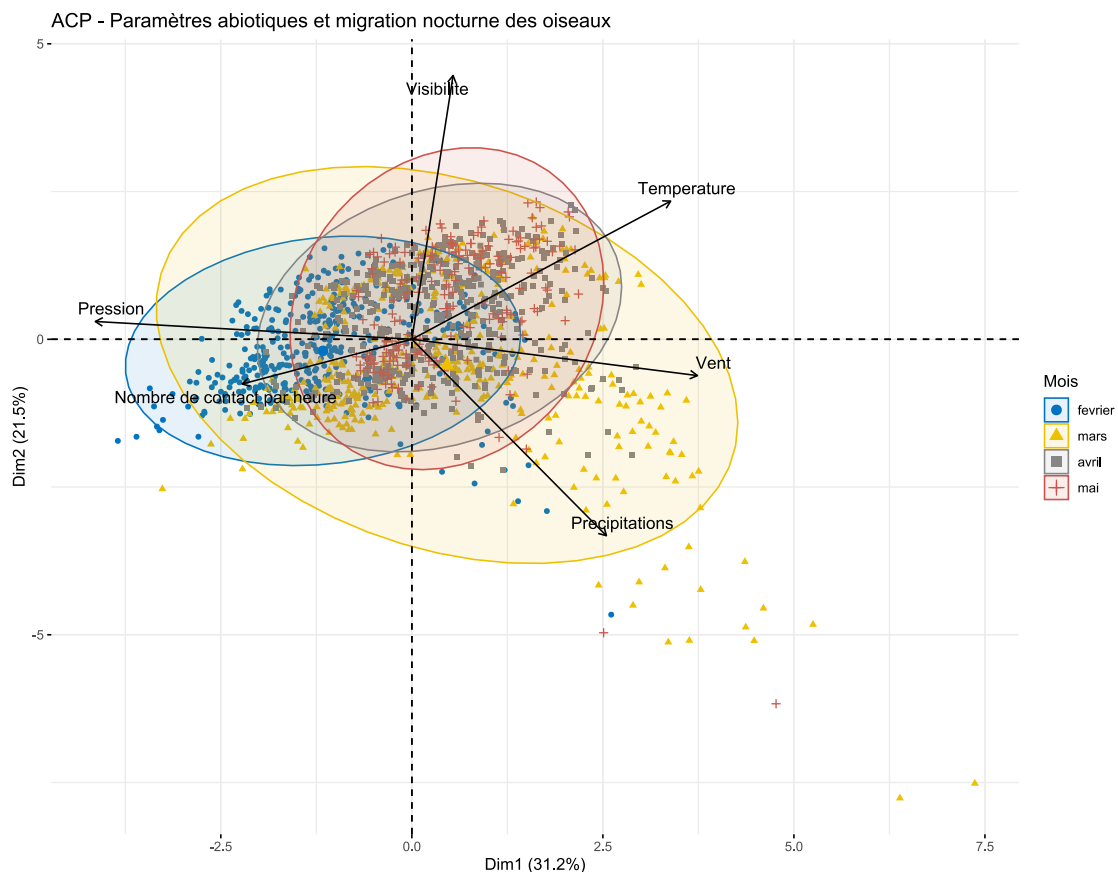


Figure 13 : Axe F1 et F2 de l'ACP, comprenant les 6 variables retenues

On constate que l'analyse n'a pas séparé clairement les résultats obtenus en fonction des différents mois, car l'ensemble des centroïdes se recoupent. Le mois de mars est sans doute celui présentant le plus de valeurs extrêmes, avec pour effet l'élargissement du cercle. Certaines tendances sont néanmoins perceptibles : par lecture graphique, les mois d'avril et de mai semblent être plus chauds que le mois de février. Il semblerait que les précipitations aient été plus importantes durant le mois de mars. La diminution du vent semble avoir un effet sur le nombre de contacts par heure, qui tends donc à être plus faible. Enfin, la température semble être corrélée négativement avec le nombre de contacts par heure.

Le test de corrélation de Spearman a été utilisé afin d'observer si certaines variables étaient corrélées entre-elles. Il était spécifiquement question ici de savoir si la variable

« Nombre d'individus contactés par heure » était corrélée avec un des paramètres météorologiques. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 6).

| Métrique       | Hypothèse                   | rho         | Résultats |                             |
|----------------|-----------------------------|-------------|-----------|-----------------------------|
|                |                             |             | p-value   | Interprétation              |
| Température    | Corrélation négative        | -0.1698426  | 8.022e-11 | Corrélation négative        |
| Visibilité     | Aucune corrélation          | 0.002174381 | 0.9342    | Aucune corrélation          |
| Vent           | Faible corrélation négative | -0.2786167  | < 2.2e-16 | faible corrélation négative |
| Pression       | Aucune corrélation          | 0.1731      | 3.466e-11 | Faible corrélation positive |
| Précipitations | Faible corrélation négative | -0.161057   | 7.304e-10 | Faible corrélation négative |

Tableau 6 : Récapitulatif des tests de Spearman par variable testée

La corrélation négative pressentie entre la température et le nombre de contacts s'est confirmée ici. D'autres corrélations sont également perceptibles sans pour autant être interprétables.

Afin de vérifier s'il existe une différence significative de ces mêmes données en fonction des mois, un test de pairwise PERMANOVA a été effectué. Les résultats de l'analyse indiquent que les groupes (les différents mois) ont un impact significatif sur la manière dont les données météorologiques varient. La valeur très faible de la **p-value** à **0.001** montre que les différences que nous avons observées entre les groupes ne sont pas dues au hasard. Les groupes expliquent environ **15.38%** des différences totales que nous voyons dans les données. Cependant, même si les mois ont un impact important, il reste encore beaucoup de variations (= **84.62%**) qui ne sont pas expliquées par ces derniers.

### 3.3.2 Analyse Factorielle de Correspondance

L'analyse AFC a été conduite sur les 36 taxons d'oiseaux pouvant être contactés sur la période d'enregistrement définie. 3 taxons présentant des effectifs trop faibles ou irrégulièrement très abondants ont été enlevés de l'analyse afin de limiter les valeurs aléatoires/extrêmes : l'Engoulevent d'Europe, la Grue cendrée et le Coucou gris.

Les deux premières dimensions expliquent 28,5% de l'inertie des données tandis que la troisième dimension 8,1% de variance (Figure 14). Il apparaît donc nécessaire de réaliser la projection sur l'axe F1-F3.

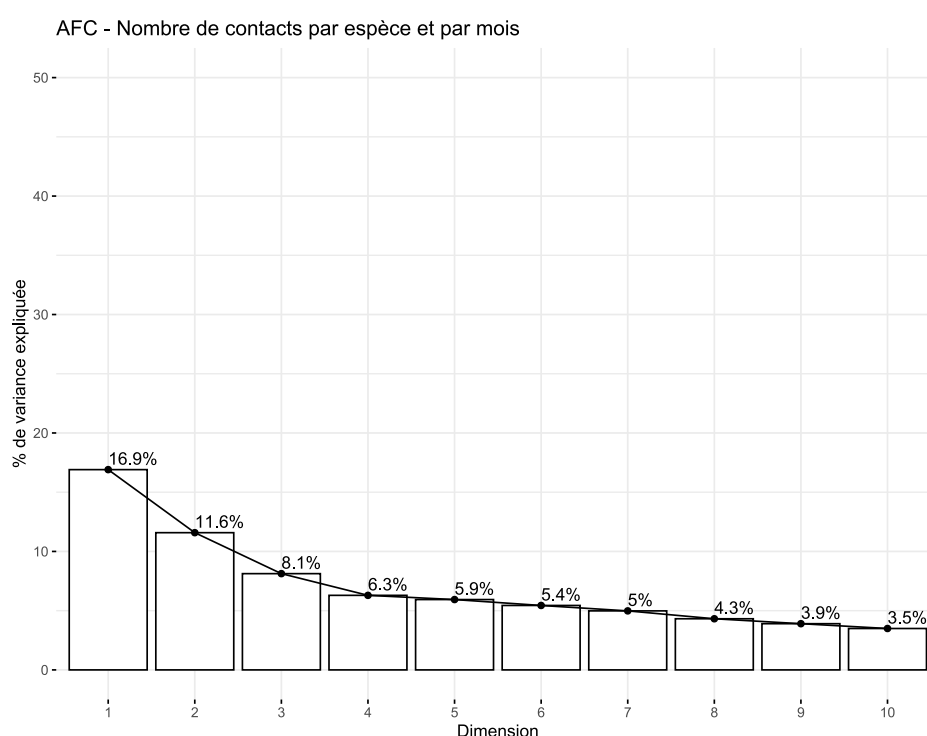


Figure 14 : Représentation graphique des valeurs propres de chacune des dimensions de l'AFC

Les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 forment des groupes similaires, seuls les axes F1-F2 seront donc présentés. En projetant « nombre de contacts » sur le plan formé par F1-F2 (Figure 15), l'analyse permet une séparation des différents mois (centroïdes). Les mois de février, mars et mai semblent statistiquement différents. À l'inverse, le mois d'avril est imbriqué dans le centroïde du mois de mai, ce qui suggère une proximité statistique entre ces deux mois.

Il existerait donc un effet mois influençant la diversité et l'abondance des espèces contactées. Plusieurs cortèges d'espèces se dessinent statistiquement : c'est le cas des Turdids (les trois espèces de Grive) ou encore des Limicoles (Vanneau huppé, Pluvier doré).

Afin de confirmer les différences statistiques entre les mois observables par lecture graphique, un test de PERMANOVA a été effectué sur les données numériques. Les résultats démontrent une variation significative de **18,74 %** expliquée par les mois. Ces derniers exercent une influence notable sur la composition des cortèges d'espèces, comme en témoigne la valeur très faible de la statistique p (**p < 0.001**). Ces résultats suggèrent fortement que les mois jouent un rôle essentiel dans les variations de composition des données observées.



Figure 15 : Axes F1-F2 de l'AFC, comprenant les 36 taxons d'oiseaux utilisés pour l'analyse

## 4. DISCUSSION

Parmi les espèces les plus contactées sur l'ensemble de la période échantillonnée, l'Œdicnème criard arrive en tête, avec presque 500 contacts entre le 1<sup>er</sup> février et le 15 mai. Cette donnée est particulièrement intéressante pour illustrer l'importance de cette méthode de suivi par écoute acoustique. En effet, sur l'ensemble de l'année de prospection, cette espèce n'a pas été contactée une seule fois durant les suivis diurnes. Bien qu'il semble assez évident étant donné l'écologie de l'espèce que le nombre de contacts n'équivaut pas à un nombre d'individus stricto sensu (individus stationnant plusieurs jours sur site), l'apport massif de cette nouvelle espèce permet de compléter les bases de données, et ainsi affiner le volet biodiversité de l'étude d'impacts. À noter que la bibliographie scientifique décrit la migration pré-nuptiale de l'œdicnème comme relativement discrète, avec assez peu de groupes observés durant la période printanière (INPN - MNHN). Ainsi, il conviendrait de suivre

d'autant plus les déplacements migratoires postnuptiaux afin d'obtenir une vision encore plus précise de l'occupation du site.

Un des intérêts des méthodes bioacoustiques réside dans la capacité de détection d'une grande partie de la faune nocturne, y compris les espèces avifaunistiques non-migratrices. Ainsi, l'échantillonnage a permis d'obtenir une quantité non-négligeable de données de ce type, notamment pour les rapaces nocturnes. Bien que ce ne soit pas l'objectif premier, ces données s'ajoutent également aux bases de données et viennent les compléter.

Comme il est possible de le constater sur les résultats du nombre de contacts par mois (Figure 9), les contacts de migrants sont majoritaires face aux contacts d'individus locaux. Cette observation, bien que confortant l'utilité de la méthode bioacoustique utilisée ici, soulève une limite à la méthode employée. Pour rappel, un individu est considéré comme migrant à partir du moment où la date du contact correspond avec la période de migration de son espèce. Cependant, il reste relativement complexe de ne se limiter qu'à ce postulat, car il omet l'existence de déplacements autres que migratoires. Ainsi, il est possible que le nombre d'individus considérés comme migrants ait été surestimé durant cette étude.

Les graphiques de l'ACP et les tests réalisés ont permis de montrer une corrélation négative entre le vent et le nombre d'individus contactés. Cette relation entre ces deux paramètres pourrait s'expliquer par une diminution de l'activité migratoire lors des épisodes venteux. Une autre explication plausible pourrait être d'ordre technique : des perturbations venteuses peuvent rendre la détection des individus en migration plus compliqué du fait de la saturation du sonogrammes entraînant une baisse de lisibilité (Annexe 6). L'ACP a également mise en avant une différence significative de la météo en fonction des mois.

D'un point de vue statistique, les différents résultats obtenus ne nous montrent qu'une influence, certes faible mais bien présente, des conditions météorologiques sur le nombre d'individus contactés par nuit. Néanmoins, il convient de nuancer ces propos. En effet, la station météorologique qui a été choisie dans le cadre de cette étude est située à 37 kilomètres de notre site. Les conditions météorologiques étant bien souvent localisées, les différentes données de températures, de vent (et de rafales), ou encore de précipitations peuvent grandement varier dans le temps et dans l'espace. Il aurait sans doute été plus intéressant de récolter nos propres données météorologiques sur le site, afin de s'assurer de leur précision. Des stations plus proches existaient mais ne mettaient malheureusement pas leurs données à disposition. L'effet de la météo sur la migration nocturne de l'avifaune nécessite donc d'avantage de prospections afin d'en évaluer précisément son impact, notamment sur les cortèges d'espèces et pas seulement sur le nombre d'individus.

La lecture graphique de l'AFC et le test de PERMANOVA associé nous permettent de mettre en lumière un effet des mois sur les cortèges de migrants ainsi que le nombre d'individus contactés. Ces différents cortèges d'espèces sont visibles sur le graphique d'AFC.

Ces éléments permettent de confirmer les hypothèses émises au commencement de notre étude. Il existe en effet différents cortèges de migrants ayant des caractéristiques phénologiques différentes, à savoir une période de migration différente. Ces différences de phénologie sont bien connues de la littérature scientifique actuelle. Dans le cadre d'une étude scientifique, il est donc primordial de prendre en compte ces différences de phénologie. Par exemple, la Grive mauvis : cette petite grive qui n'est qu'hivernante en France amorce sa migration de fin février à tout début avril, avec un pic au mois de mars (Ricci, s.d.). La lecture graphique de l'AFC met bien en avant cette période migratoire.

Les résultats de l'AFC mettent en avant une différence statistique significative entre les mois d'échantillonnage, mais ces résultats sont également à nuancer. En effet, comme spécifier dans le protocole utilisé ici, deux individus sont considérés comme différents à partir du moment où leur NFC (Nocturnal Flight Call) sont distants d'un pas de temps supérieur à 1 minute (hors cas particulier : espèce criant en continue par exemple). Cette spécification du protocole induit donc un biais important, pouvant surestimer le nombre d'individus qui passe au-dessus de l'enregistreur. De plus, il est également possible de comptabiliser deux individus différents alors qu'il se s'agit que d'un seul individu passant deux fois à deux périodes différentes.

Comme observé précédemment, les données météorologiques impactent les cortèges de migrants, mais elles ont également un impact moins facilement quantifiable sur les capacités de détection des cris de vol nocturnes. Un des prérequis de la méthode utilisée ici réside dans la présence de conditions acoustiques favorables. La pluie, le vent et l'ensemble des perturbations acoustiques induites (bruits de feuilles, de branches) entraînent la saturation des micros, et rendent impossible toute forme d'identification (Annexe 6). S'ajoutent à cela l'ensemble des bruits parasites intimement liés au placement du SM Mini sur le site d'écoute. La présence d'une ferme à proximité (vaches, chiens, humains), d'un chemin à proximité directe de l'enregistreur (voitures, engins agricoles) représentent des perturbations importantes, pouvant masquer certains cris.

D'un point de vue technique, le matériel est un élément central dans le cadre de l'enregistrement de la migration nocturne. Les différents tests réalisés dans l'objectif d'évaluer la capacité de détection de l'avifaune démontrent les limites de portée et donc de puissance de détection des SM Mini, au-delà de 350 mètres. Il est alors inexact de parler du suivi de la migration nocturne à l'échelle d'un site entier, les captations étant très localisées sur le dit site. Afin de palier à cette limitation technique, une des solutions qui pourrait être mise en place serait le cadrillage du site d'étude par plusieurs enregistreurs, qui enregistreraient en simultané et établiraient un lien entre les différents contacts auditifs, dans le but de trianguler la position et la direction de l'oiseau contacté. Ces solutions, bien que techniquement réalisables, restent compliquées à mettre en place dans le cadre d'une étude d'impact.

Le temps de traitement des données récoltées représente une autre limite importante à la méthode décrite précédemment. En effet, une nuit d'environ 13 heures d'enregistrement prends en moyenne 1h07 à être entièrement traitée ( $n = 10$ ), avec des valeurs allant de 32 minutes au minimum et jusqu'à 1h39 au maximum. Le nombre de contacts pour ce même échantillon de 10 nuits se situe en moyenne à 28,1 contacts, avec un minimum de 2 et un maximum de 63 (Annexe 4). Ainsi, il est complexe de réaliser le suivi complet d'un site comportant plusieurs enregistreurs. De ce fait, il est évident qu'un suivi de la migration sur les deux périodes principales (pré et postuptiale) aurait été intéressant, notamment dans la comparaison des résultats obtenus ainsi que la caractérisation des cortèges de migrants. Néanmoins, en dépit de l'intérêt scientifique des données potentiellement récoltées, le caractère chronophage reste un frein à de plus amples prospections. Il est possible d'imaginer dans un avenir proche le développement d'outils d'automatisation du traitement des données acoustiques, notamment grâce à des modèles d'intelligence artificielle, à l'instar du projet NBM (BIOPHONIA, CESCO, & LPO, 2021).

Il est à l'heure actuelle impossible de dénombrer avec précisions le nombre d'individus criant simultanément, au-delà de 4 individus environ. La valeur « nombre d'individus contactés » est donc à prendre avec beaucoup de nuances, car il existe encore une zone d'ombre quant à l'aspect quantitatif de cette migration. Si un seul individu effectue un cri de vol nocturne, cela ne signifie pas forcément qu'il est seul à migrer. La réciproque est également vraie : ce n'est pas parce qu'il n'y a aucun NFC qu'il n'y a aucun migrant nocturne de passage. L'émission des cris de vols est encore assez mal connue dans la littérature scientifique, il convient donc de porter un œil prudent quant aux données récoltées. Afin de palier à cette problématique et à toutes les autres qui en découlent, il pourrait être envisagé de compléter les données récoltées qualitativement avec un autre système que l'acoustique. Le système radar (radars météorologiques par exemple) semble tout à fait à même de répondre à cette problématique, d'autant plus qu'il a été largement utilisé dans l'étude de la migration de l'avifaune depuis plusieurs décennies (Gauthreaux & Belser, 1998).

L'intégration des données issues du chorus matinal pose également question. En effet, au-delà des difficultés d'identification des différentes espèces pendant cette période d'effervescence, il est plus compliqué d'interpréter le caractère migrant de certaines espèces. Des investigations sur le choix de la période de crépuscule pourraient être menées, afin de savoir s'il est plus judicieux de travailler avec les données de crépuscule astronomique.

## 5. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de comprendre l'importance de la méthode d'échantillonnage de la migration nocturne de l'avifaune par écoute acoustique. À partir des 2600 contacts obtenus, nous avons mis en avant des grandes tendances migratoires liées à la phénologie des espèces migratrices mais aussi aux conditions météorologiques. Nous avons pu ajouter 23 nouvelles espèces d'oiseaux aux bases de données déjà existantes pour ce site. Nous avons mis en lumière l'existence de certains cortèges de migrants nocturnes, tout en appréciant l'entière mesure de l'apport de ces données écologiques nouvelles.

Dans le cadre d'un diagnostic environnemental, cette méthode encore peu exploitée hors du domaine universitaire mérite que l'on s'y intéresse, afin d'appréhender au mieux la richesse et l'importance écologique d'un site.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

(2023). Récupéré sur XENO-CANTO: <https://xeno-canto.org/>

(2023). Récupéré sur CRBPO: <https://crbpo.mnhn.fr/>

BIOPHONIA, CESCO, & LPO. (2021). *Projet Nocturnal Bird Migration (NBM)*.

Bussière, R. (2016, avril). Tendances à long terme de la phénologie de migration prénuptiale. (LPO, Éd.) *L'Outarde*.

climatologie, O. f. (2023). *Pression atmosphérique*. Récupéré sur Météo Suisse: <https://www.meteosuisse.admin.ch/meteo/meteo-et-climat-de-a-a-z/pression-atmospherique.html#:~:text=La%20pression%20atmosph%C3%A9rique%20se%20mesure,m%C3%A8tre%20carr%C3%A9%20p%C3%A8se%2010%20tonnes>.

Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage. (2021, octobre 9). *La Journée mondiale des oiseaux migrants du 9 octobre célèbre les oiseaux et la nature*. Bonn. Récupéré sur Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage: <https://www.cms.int/fr/news/la-journ%C3%A9e-mondiale-des-oiseaux-migrateurs-du-9-octobre-c%C3%A9l%C3%A8bre-les-oiseaux-et-la-nature>

CPIE Sud-Champagne, Boralex, Ecosphère. (2021). *Bridage agricole : une mesure crédible pour réduire la mortalité aviaire ?*

E. VISSER, M., C. PERDECK, A., & H. VAN, J. (2009). *Climate change leads to decreasing bird migration distances*.

- Fréquence d'échantillonnage et Bit Depth.* (2023). Récupéré sur ORSONOR: <https://orsonor.com/frequence-d-echantillonnage-et-bit-depth/#:~:text=Le%20Taux%20d'%C3%A9chantillonnage%20ou,exprime%20en%20Hertz%20ou%20Hz>.
- Gasparatos, A., N.H. Doll, C., Esteban, M., Ahmed, A., & A. Olang, T. (2016). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy.
- Gauthreaux, S., & Belser, C. (1998, Juin 01). Displays of Bird Movements on the WSR-88D: Patterns and Quantification. *American Meteorological Society*.
- Gravador Song Meter Mini.* (s.d.). Récupéré sur LOGNATURE: <https://www.lognature.com.br/produto/gravador-song-meter-mini/>
- Indice humidex et le travail - CCHST.* (2023). Récupéré sur CCHST: [https://www.cchst.ca/oshanswers/phys\\_agents/humidex.html#:~:text=Qu'est%2Dce%20que%20l'humidex%3F,-Haut%20de%20la&text=L'humidex%20est%20une%20mesure,de%20l'humidit%C3%A9%20est%20per%C3%A7u](https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/humidex.html#:~:text=Qu'est%2Dce%20que%20l'humidex%3F,-Haut%20de%20la&text=L'humidex%20est%20une%20mesure,de%20l'humidit%C3%A9%20est%20per%C3%A7u).
- INPN - MNHN. (s.d.). *Oedicnème criard, Burhinus oedicnemus (Linné, 1758)* . Récupéré sur Cahiers d'Habitat « Oiseaux » - MEEDDAT- MNHN – Fiche projet : <https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Oedicneme-criard.pdf>
- INPN. (2017).
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). *FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis*.
- LPO Alsace. (2020, décembre). *Les observations en période de migration*. Récupéré sur LPO Alsace: <https://alsace.lpo.fr/index.php/les-observations-en-periode-de-migration>
- Ministère de la Transition écologique. (2021). *Séquence ERC - Une démarche pour intégrer l'environnement dans l'aménagement du territoire*. Récupéré sur [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/21199\\_ERC-synthese\\_FICHE\\_BATweb.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/21199_ERC-synthese_FICHE_BATweb.pdf)
- NCA. (2021). *Etat initial - Projet de Parc photovoltaïque - NCA Environnement*.
- NCA Environnement. (2023). *Etat initial - Etude d'impacts*.
- Point de rosée.* (2023). Récupéré sur Wikipédia: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Point\\_de\\_ros%C3%A9e#:~:text=Le%20point%20de%20ros%C3%A9e%20ou,surfaces%2C%20par%20effet%20de%20saturation](https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_de_ros%C3%A9e#:~:text=Le%20point%20de%20ros%C3%A9e%20ou,surfaces%2C%20par%20effet%20de%20saturation).
- Réseau Migration. (2023). *Diversité des migrations*. Récupéré sur Migration: [https://www.migration.net/index.php?m\\_id=22004&item=4](https://www.migration.net/index.php?m_id=22004&item=4)

- Réseau Migration. (2023). *Les stratégies des migrants*. Récupéré sur Migration: [https://www.migration.net/index.php?m\\_id=22006&item=6](https://www.migration.net/index.php?m_id=22006&item=6)
- Réseau Migration. (2023). *Migration - Généralités*. Récupéré sur Migration: [https://www.migration.net/index.php?m\\_id=22016&item=16](https://www.migration.net/index.php?m_id=22016&item=16)
- Ricci, J. (s.d.). *Grive mauvis*. Récupéré sur Observatoire Migrants: <https://www.observatoiremigrants.com/grive-mauvis/>
- RStudio Team. (2020). Récupéré sur RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston: <http://www.rstudio.com/>.
- Service des données et des études statistiques. (2022). *Chiffre clés des énergies renouvelables*.
- Tableau d'observations pour Angoulême - Brie Champniers (16) ( 132 m ). (2023). Récupéré sur Meteociel: [https://www.meteociel.fr/temps-reel/obs\\_villes.php?code2=7420&jour2=1&mois2=1&annee2=2023](https://www.meteociel.fr/temps-reel/obs_villes.php?code2=7420&jour2=1&mois2=1&annee2=2023)
- TRABA, J., & PEREZ-GRANADOS, C. (2021, Février). *Estimating bird density using passive acoustic monitoring: a review of methods and suggestions for further research*.
- Tual, S. (2018, 02 20). *Qu'est ce que le windchill ? - Actualités météo - Météo Bretagne*. Récupéré sur Météo Bretagne: <http://www.meteo.bzh/actualite/Qu-est-ce-que-le-windchill--20180220#:~:text=Le%20windchill%20autrement%20appel%C3%A9%20le,prot%C3%A9ge%C3%A9%20par%20sa%20chaleur%20corporelle>.
- WILDLIFE ACOUSTIC. (2023, 07). Récupéré sur SONG METER MINI ACOUSTIC RECORDER: <https://www.wildlifeacoustics.com/products/song-meter-mini>
- WROZA, S., & ROCHEFORT, J. (2021). *La migration nocturne par le son*. DELACHAUX ET NIESTLE.

## 7. ANNEXES

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Œdicnème criard       | 485 |
| Vanneau huppé         | 407 |
| Merle noir            | 276 |
| Grive mauvis          | 257 |
| Grive musicienne      | 230 |
| Effraie des clochers  | 170 |
| Chevêche d'Athéna     | 169 |
| Alouette des champs   | 105 |
| Grue cendrée          | 102 |
| Rougegorge familier   | 88  |
| Caille des blés       | 40  |
| Chouette hulotte      | 35  |
| Corneille noire       | 32  |
| Gallinule poule-d'eau | 32  |
| Grèbe castagneux      | 27  |
| Pluvier doré          | 24  |
| Héron cendré          | 16  |
| Foulque macroule      | 14  |
| Pigeon ramier         | 12  |
| Engoulevent d'Europe  | 11  |
| Alouette lulu         | 10  |
| Sarcelle d'hiver      | 9   |
| Accenteur mouchet     | 8   |
| Petit-duc scops       | 7   |
| Hibou moyen-duc       | 6   |
| Courlis cendré        | 6   |
| Troglodyte mignon     | 5   |
| Mésange charbonnière  | 3   |
| Canard pilet          | 3   |
| Grive draine          | 3   |
| Aigrette garzette     | 2   |
| Tarier pâtre          | 2   |
| Canard colvert        | 2   |
| Bihoreau gris         | 2   |
| Pinson des arbres     | 2   |
| Etourneau sansonnet   | 2   |
| Mouette rieuse        | 1   |
| Mouette mélanocéphale | 1   |
| Coucou gris           | 1   |

*Annexe 1 : Liste de l'ensemble des espèces contactées en période nocturne*

|    | A        | B          | C        | D        | E        | F    | G       | H         | I        |
|----|----------|------------|----------|----------|----------|------|---------|-----------|----------|
| 1  | Nb_conta | Visibilite | Temperat | Humidite | Point_de | Vent | Rafales | Precip_mr | Pression |
| 2  | 8        | 59         | 8.6      | 0.73     | 4        | 10   | 13      | 0         | 1033.1   |
| 3  | 2        | 55.1       | 7.2      | 0.77     | 3.4      | 8    | 14      | 0         | 1033.4   |
| 4  | 5        | 20         | 6.7      | 0.8      | 3.5      | 9    | 11      | 0         | 1033.8   |
| 5  | 4        | 38         | 6.6      | 0.79     | 3.2      | 11   | 15      | 0         | 1034.2   |
| 6  | 1        | 19.9       | 5.8      | 0.8      | 2.6      | 4    | 14      | 0         | 1034.7   |
| 7  | 5        | 19.9       | 5.2      | 0.82     | 2.4      | 0    | 6       | 0         | 1034.9   |
| 8  | 10       | 19.2       | 5.2      | 0.84     | 2.7      | 0    | 8       | 0         | 1035.1   |
| 9  | 5        | 18.9       | 5.6      | 0.8      | 2.4      | 3    | 8       | 0         | 1034.8   |
| 10 | 4        | 18.1       | 5.1      | 0.82     | 2.3      | 5    | 7       | 0         | 1034.3   |
| 11 | 3        | 15.9       | 4.3      | 0.89     | 2.6      | 5    | 17      | 0         | 1034.4   |
| 12 | 4        | 15.7       | 4.4      | 0.88     | 2.6      | 2    | 8       | 0         | 1034.3   |
| 13 | 0        | 16.9       | 4.8      | 0.87     | 2.8      | 0    | 8       | 0         | 1034.1   |
| 14 | 0        | 16.5       | 4.7      | 0.87     | 2.7      | 2    | 10      | 0         | 1034.5   |
| 15 | 3        | 15.7       | 4.7      | 0.88     | 2.9      | 4    | 13      | 0         | 1034.9   |
| 16 | 5        | 56.4       | 8.6      | 0.62     | 1.7      | 8    | 15      | 0         | 1035.8   |
| 17 | 6        | 53         | 7.5      | 0.66     | 1.6      | 6    | 10      | 0         | 1036.3   |
| 18 | 5        | 48.5       | 6.9      | 0.68     | 1.4      | 6    | 10      | 0         | 1036.5   |
| 19 | 6        | 46.9       | 6.3      | 0.71     | 1.4      | 7    | 10      | 0         | 1036.6   |
| 20 | 3        | 45         | 5.5      | 0.73     | 1        | 7    | 9       | 0         | 1036.6   |
| 21 | 3        | 41.9       | 4.9      | 0.74     | 0.7      | 8    | 10      | 0         | 1036.8   |
| 22 | 2        | 20         | 4.6      | 0.75     | 0.5      | 6    | 10      | 0         | 1037.3   |
| 23 | 3        | 41         | 4.3      | 0.76     | 0.4      | 8    | 9       | 0         | 1037.2   |
| 24 | 2        | 19.5       | 3.3      | 0.81     | 0.3      | 8    | 10      | 0         | 1037.3   |
| 25 | 3        | 19.8       | 2.9      | 0.85     | 0.6      | 8    | 12      | 0         | 1037.5   |
| 26 | 2        | 19.8       | 2.6      | 0.85     | 0.3      | 7    | 9       | 0         | 1037.1   |
| 27 | 2        | 35.5       | 2.5      | 0.85     | 0.2      | 8    | 9       | 0         | 1036.9   |
| 28 | 3        | 20         | 1.3      | 0.86     | -0.8     | 6    | 9       | 0         | 1037     |
| 29 | 7        | 17.3       | 0.4      | 0.93     | -0.6     | 3    | 6       | 0         | 1036.4   |
| 30 | 5        | 19.9       | 7.3      | 0.68     | 1.8      | 11   | 22      | 0         | 1036.7   |
| 31 | 3        | 59.9       | 5.2      | 0.76     | 1.3      | 10   | 14      | 0         | 1037.1   |
| 32 | 8        | 45.1       | 4.5      | 0.79     | 1.2      | 8    | 12      | 0         | 1037.4   |

Annexe 2 : Tableau obtenu après la fusion des données météorologiques et du nombre de contacts

|    | A          | B       | C           | D             | E            | F             | G             | H              | I            | J            | K           | L            | M            | N           | O             | P              | Q           | R            |
|----|------------|---------|-------------|---------------|--------------|---------------|---------------|----------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|---------------|----------------|-------------|--------------|
| 1  | Jour       | Mois    | Accenteur m | Aigrette garz | Alouette des | Alouette lulu | Bihoreau gris | Caille des ble | Canard colve | Canard pilet | Cheveche d' | Chouette hul | Cornelle noi | Coucou gris | Courlis cendr | Effraie des cl | Engoulevent | Etourneau sa |
| 2  | 01/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 2            | 0            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 3  | 02/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 4           | 2            | 1            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 4  | 03/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 2           | 0            | 0            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 5  | 04/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 6  | 05/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 1           | 0            | 0            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 7  | 06/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 2              | 0           | 1            |
| 8  | 07/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 9  | 08/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 10 | 09/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 1            | 0            | 0           | 0             | 3              | 0           | 0            |
| 11 | 10/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 1            | 2            | 0           | 0             | 6              | 0           | 0            |
| 12 | 11/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 3              | 0           | 0            |
| 13 | 12/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 1           | 2            | 1            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 14 | 13/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 1             | 0             | 0              | 0            | 0            | 3           | 0            | 1            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 15 | 14/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 1             | 0             | 0              | 0            | 0            | 5           | 0            | 0            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 16 | 15/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 2            | 1             | 0             | 0              | 0            | 0            | 4           | 1            | 1            | 0           | 0             | 3              | 0           | 0            |
| 17 | 16/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 4           | 0            | 0            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 18 | 17/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 1            | 5           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 19 | 18/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 1            | 0            | 7           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 20 | 19/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 4           | 0            | 1            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 21 | 20/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 2            | 2             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 2            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 22 | 21/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 2            | 1             | 0             | 0              | 0            | 0            | 4           | 0            | 0            | 0           | 0             | 5              | 0           | 0            |
| 23 | 22/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 6           | 0            | 0            | 0           | 0             | 3              | 0           | 0            |
| 24 | 23/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 1            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 25 | 24/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 26 | 25/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 2            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 27 | 26/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 3            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 28 | 27/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 29 | 28/02/2023 | fevrier | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 30 | 01/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |
| 31 | 02/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 0            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 32 | 03/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 2            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 33 | 04/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 3            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 1           | 0            | 1            | 0           | 0             | 1              | 0           | 0            |
| 34 | 05/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 2            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 35 | 06/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 3            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 1           | 0            | 0            | 0           | 2             | 0              | 0           | 0            |
| 36 | 07/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 3            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 2           | 0            | 1            | 0           | 0             | 2              | 0           | 0            |
| 37 | 08/03/2023 | mars    | 0           | 0             | 1            | 0             | 0             | 0              | 0            | 0            | 0           | 0            | 0            | 0           | 0             | 0              | 0           | 0            |

Annexe 3 : Tableau utilisé pour l'AFC



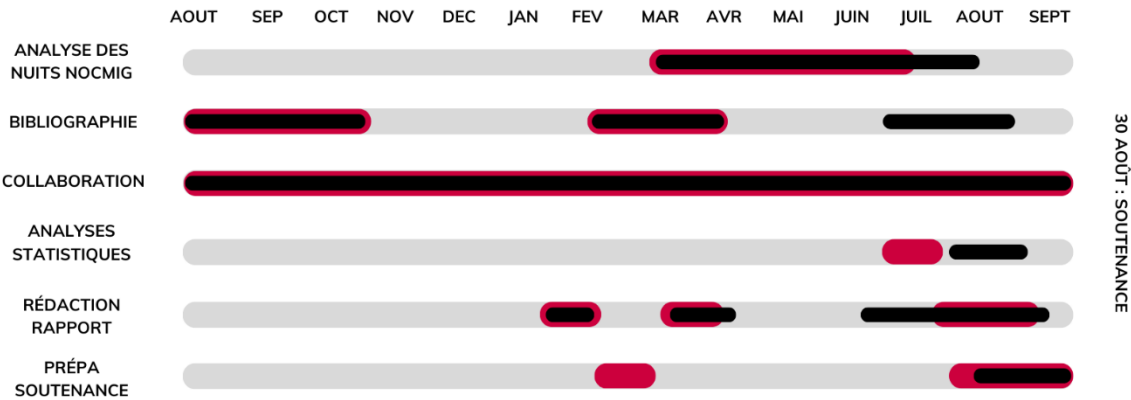
CLÉMENT RIMBERT

DIAGRAMME DE GANTT



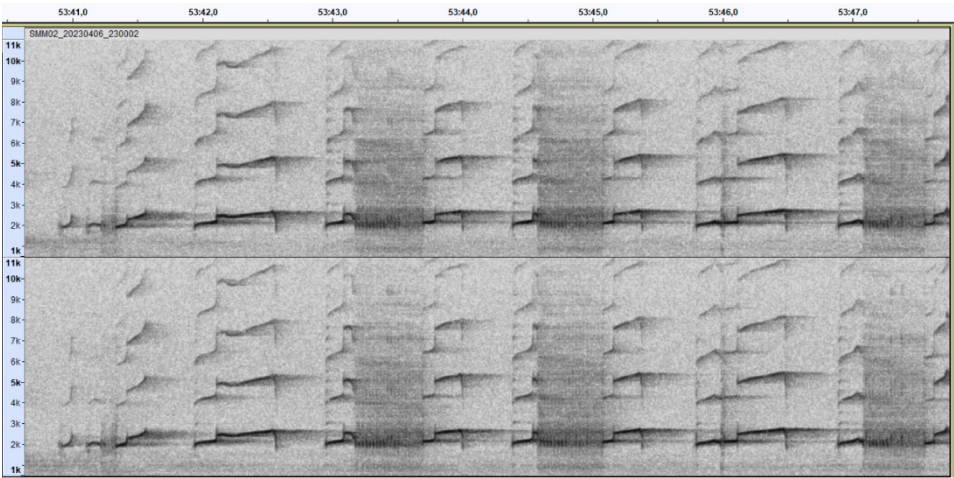
Suivi de la migration nocturne par écoute  
acoustique : une méthode innovante permettant  
une meilleure appréhension des écosystèmes

Prévisionnel  
Réal

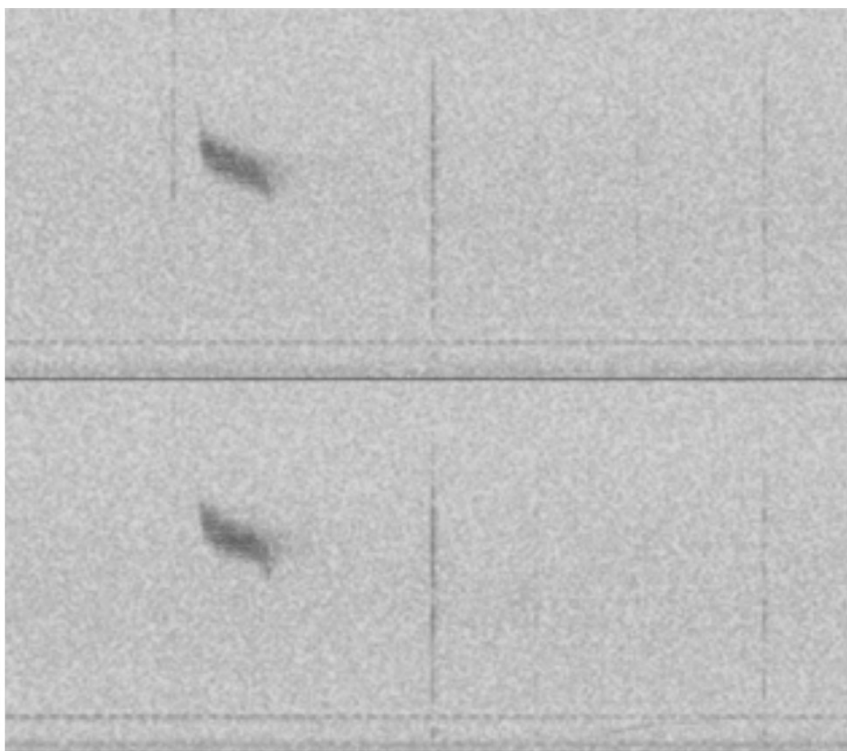


Annexe 7 : Diagramme de GANTT sujet d'alternance

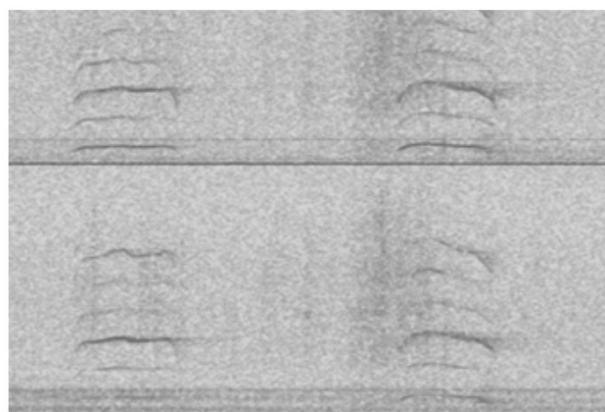
Annexe 8 : Enregistrement  
d'un cri d'Ædicnème criard  
de nuit



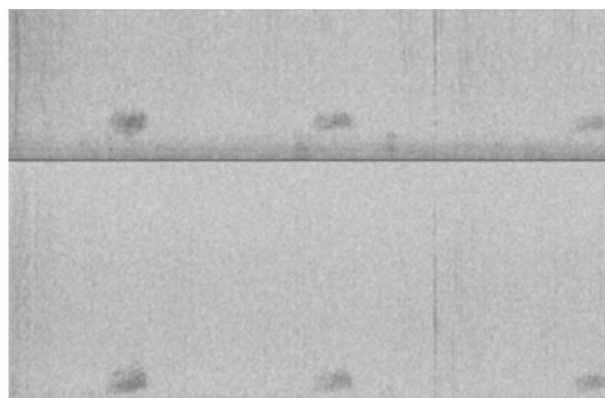
Grive mauvis



Vanneau huppé



Effraie des clochers



Pluvier doré

*Annexe 9 : Echantillons d'enregistrements nocturnes de différentes espèces*