

Suivi acoustique de biodiversité dans la Réserve Naturelle Nationale de la Haute Chaîne du Jura



Rapport modifié – Juillet 2024

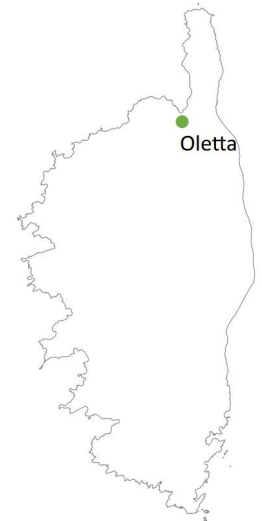


Réserve Naturelle Nationale
de la Haute Chaîne du Jura

Citation : Catherine Seytre, Manon Ducrettet, Sarah Bitsch, Juliette Linossier, Léo Papet

Présentation de BioPhonia

Fondée par trois chercheur·ses en bioacoustique, BioPhonia est la seule entreprise française de prestation de services spécialisée en bioacoustique et en écoacoustique terrestre. La structure s'inscrit dans une démarche d'Économie Sociale et Solidaire (ESS). BioPhonia se positionne à l'interface du monde de la recherche et du travail de terrain afin de développer des méthodes et des outils innovants au service des gestionnaires de la biodiversité. L'équipe de BioPhonia offre ses services dès la conception d'un protocole avec le client, jusqu'à la pose et la maintenance du matériel. Elle gère le stockage et l'analyse des données ainsi que leur valorisation. Les collaborateurs et collaboratrices de BioPhonia possèdent toutes les compétences techniques en analyse afin de réaliser les demandes du cahier des charges, comme le montrent leurs références scientifiques. Le siège social de BioPhonia est situé en Haute-Corse.



L'équipe de BioPhonia

Dr. Léo Papet
Co-fondateur

Bioacoustique
Acoustique
Traitement du signal

Dr. Juliette Linossier
Co-fondatrice

Bioacoustique
Statistiques
Comportement animal

Dr. Clément Cornec
Co-fondateur

Bioacoustique
Biologie
Communication scientifique

Maxime Bru
Ingénieur

Traitement des signaux
Écologie
Machine Learning

Dr. Catherine Seytre
Ingénieure

Écologie
Apprentissage automatique
Aménagement du territoire

Dr. Valentin Varon
Ingénieur

AI
Traitement du signal
Communication scientifique

Manon Ducrettet
Doctorante CIFRE

Bioacoustique
Statistiques
Écologie

Paul Peyret
Ingénieur

AI
Traitement du signal
Acoustique

Claudia Meloni
Assistante administrative

Comptabilité
Gestion
Communication

Sarah Bitsch
Alternante

Écologie
Bioacoustique
Suivi naturaliste

Tanguy Loïs
Étudiant en stage

Écologie
Bioacoustique
Ornithologie

Pauline Guinet
Étudiante en stage

Écologie
Bioacoustique
Suivi naturaliste

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Sualello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	4
Contexte.....	4
Objectifs.....	5
Méthodes.....	6
Déploiement des enregistreurs et protocole d'enregistrement.....	6
Détectabilité des signaux acoustiques.....	8
Théorie.....	8
Aire de détection.....	8
Méthodes d'analyse des enregistrements.....	9
Caractérisation de la communauté d'oiseaux nicheurs.....	10
Détection du Grand Tétrás.....	11
Recherche de vocalisations de Loup gris.....	12
Analyse des paysages sonores.....	13
Résultats.....	15
Caractérisation de la communauté d'oiseaux nicheurs.....	15
Détection du Grand Tétrás.....	15
Détection de vocalisations de Loup gris.....	19
Analyse des paysages sonores.....	19
Evolution temporelle des indices écoacoustiques, tendances générales.....	20
Evolution des valeurs d'indices écoacoustiques au cours de la journée.....	22
Variabilité entre les placettes.....	23
Espèces d'oiseaux détectées et indices écoacoustiques.....	23
Conclusion et perspectives.....	27
Principaux résultats.....	27
Retours d'expérience.....	28
Perspectives.....	28
Bibliographie.....	30
Annexe 1 : Liste des espèces d'oiseaux nicheurs considérées.....	32

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

Contexte

La Réserve Naturelle Nationale de la Haute Chaîne du Jura (RNNHCJ) souhaite étendre ses connaissances sur les effets directs et indirects de la densité croissante d'ongulés (cerfs) revenant depuis la Suisse (D. Schloesser et J. Rosset, comm. Pers.). La densité de cerfs est caractérisée par un gradient Nord-Sud avec une densité plus élevée sur le secteur Nord de la réserve. Dans le secteur Sud de la réserve, le peuplement d'ongulés sauvages est dominé par les chevreuils et les sangliers.

Le retour d'une espèce dans un habitat peut engendrer des effets directs mais aussi indirects, notamment via un « effet cascade » :

- effets directs : les effets directement liés à la présence d'une espèce sur les autres espèces et le milieu. Dans le cas présent, l'intérêt est porté sur l'évolution de la pression d'abrutissement ;
- effets indirects : les interactions faisant intervenir plusieurs niveaux trophiques. Dans le cas présent, il s'agit de comprendre et de suivre les conséquences d'une augmentation de la pression d'abrutissement sur la ressource et/ou l'habitat pour les autres espèces présentes dans le secteur. La présence de certaines espèces d'oiseaux nicheurs de la réserve, dont le Grand Tétras, est notamment liée à la structure du sous-bois.

La RNNHCJ souhaite fédérer différents acteurs, notamment des chercheurs, autour d'un observatoire des ongulés, afin de pouvoir suivre l'évolution des populations de cerfs et les effets associés. Cet observatoire doit permettre d'étudier les populations d'ongulés et leurs impacts suivant plusieurs angles :

- Suivi des populations d'ongulés et leurs effets directs, en utilisant :
 - les données issues des études historiques sur les ongulés par pièges photos sur la partie Nord, associées aux données de comptages réalisés par la fédération de chasse. En 2018-2020, un réseau de pièges photographiques a été déployé sur le Nord de la réserve pour identifier les espèces présentes.
 - les données dendrométriques de 279 placettes forestières, sur un rayon de 20m ainsi que le retour des forestiers sur les évolutions des habitats.
 - une comparaison des pressions directes d'abrutissement sur plusieurs secteurs de la réserve, notamment sur les myrtilles, ressources alimentaires importantes pour le Grand Tétras. Une étude a été réalisée par l'INRAE de Nogent-sur-Vernisson via une comparaison de 30 placettes PSDRF (Protocole de Suivi Dendrométrique des Réserves Forestières) en effectuant des relevés de végétation, d'abrutissement et la pose de pièges photographiques sur l'été et l'automne.
- Suivi des effets indirects, en étudiant l'évolution des peuplements faunistiques et particulièrement l'avifaune. La RNNHCJ souhaite recueillir des données :
 - sur la composition des communautés d'oiseaux nicheurs,
 - sur la présence des espèces à fort enjeu de conservation sur le territoire de la RNNHCJ, dont le Grand Tétras *Tetrao urogallus*, l'Aigle royal *Aquila chrysaetos* et le Faucon pèlerin *Falco peregrinus*.
- Associer d'autres thématiques à l'observatoire, notamment l'étude de l'effet du retour des grands prédateurs sur la faune et la flore.

C'est dans ce contexte que la RNNHCJ a choisi de mettre en place une approche de suivi de biodiversité par acoustique passive permettant d'acquérir des données de qualité tout en limitant la présence humaine *in situ*.

Depuis quelques années, le suivi acoustique de la biodiversité a été identifié comme une méthode de suivi innovante, non invasive et élargissant l'effort d'échantillonnage spatial et temporel. Déployable sur terre comme en mer, cette méthode complémentaire aux méthodes de suivis traditionnels offre des solutions crédibles et très prometteuses dans le suivi des populations d'oiseaux (Ross et al., 2023). L'utilisation d'enregistreurs acoustiques automatiques permet également de réduire les biais et les perturbations liées aux observateurs (Carey, 2009).

Les protocoles d'acoustique passive permettent ainsi de récolter beaucoup d'informations tout en limitant les dérangements et la présence humaine. Cette caractéristique est particulièrement adaptée aux zones de quiétude, mises en place dans la réserve durant 6 mois de l'année. Cette étude doit permettre de décrire la communauté d'oiseaux nicheurs présente dans la RNNHCJ, mais aussi de rechercher la présence d'espèces à fort enjeu de conservation.

Objectifs

Trois objectifs principaux ont été identifiés dans le cadre de cette étude :

1. Dresser un inventaire des espèces nicheuses d'oiseaux de la RNNHCJ, sur chacune des 12 placettes d'enregistrement grâce à un protocole de bioacoustique.
2. Mener une analyse dédiée à la recherche de Grand Tétras *Tetrao urogallus* sur chacune des placettes d'enregistrement. Du fait de son statut de conservation régional « en danger critique d'extinction », l'évaluation de la présence du Grand Tétras sur le secteur de la RNNHCJ fait l'objet d'une attention particulière (Liste rouge régionale 2008). Le Grand Tétras fait également l'objet de plusieurs suivis : un suivi des places de chant, dont le nombre réduit chaque année (5 ou 6 en 2022) et un suivi génétique réalisé en 2019-2021, qui a mis en évidence une consanguinité élevée.
3. Caractériser le paysage sonore de la RNNHCJ par l'utilisation d'indices écoacoustiques, notamment en milieu de journée, lorsque la présence d'activités humaines est la plus probable.
4. A ces objectifs principaux s'est ajouté un quatrième axe, au cours de la période d'analyse des données du projet : la recherche de vocalisations de Loup gris *Canis lupus*, sur trois placettes (E09, E10 et E11).

Déploiement des enregistreurs et protocole d'enregistrement

Douze placettes ont été sélectionnées pour cette étude. Les placettes E01 à E07 sont réparties selon un gradient Sud-Nord dans la RNNHCJ, les placettes E08 à E12 sont rassemblées dans la partie Nord de la réserve.

Un enregistreur Song Meter Mini (Wildlife Acoustics) a été déployé sur chacune des 12 placettes sélectionnées, dans la RNNHCJ. Chaque enregistreur est équipé d'un microphone unique (voie gauche) enregistrant avec une fréquence d'échantillonnage de 44100Hz et un gain de 12 dB. Le protocole d'enregistrement est réparti en 3 périodes quotidiennes (Figure 1) :

- « Chorus matinal » : Enregistrement entre 2h avant le lever du soleil et 2h après le lever du soleil. 1 enregistrement de 1 minute toutes les 5 minutes (1 minute ON / 4 minutes OFF).
- Début d'après-midi : Enregistrement entre 14h et 15h. 1 enregistrement de 5 minutes toutes les 20 minutes (5 minutes ON / 15 minutes OFF), soit un total de 3 enregistrements par jour.
- « Chorus du soir » : Enregistrement entre 1h30 avant le coucher du soleil et 3h30 après le coucher du soleil. 1 enregistrement de 1 minute toutes les 5 minutes (1 minute ON / 4 minutes OFF).

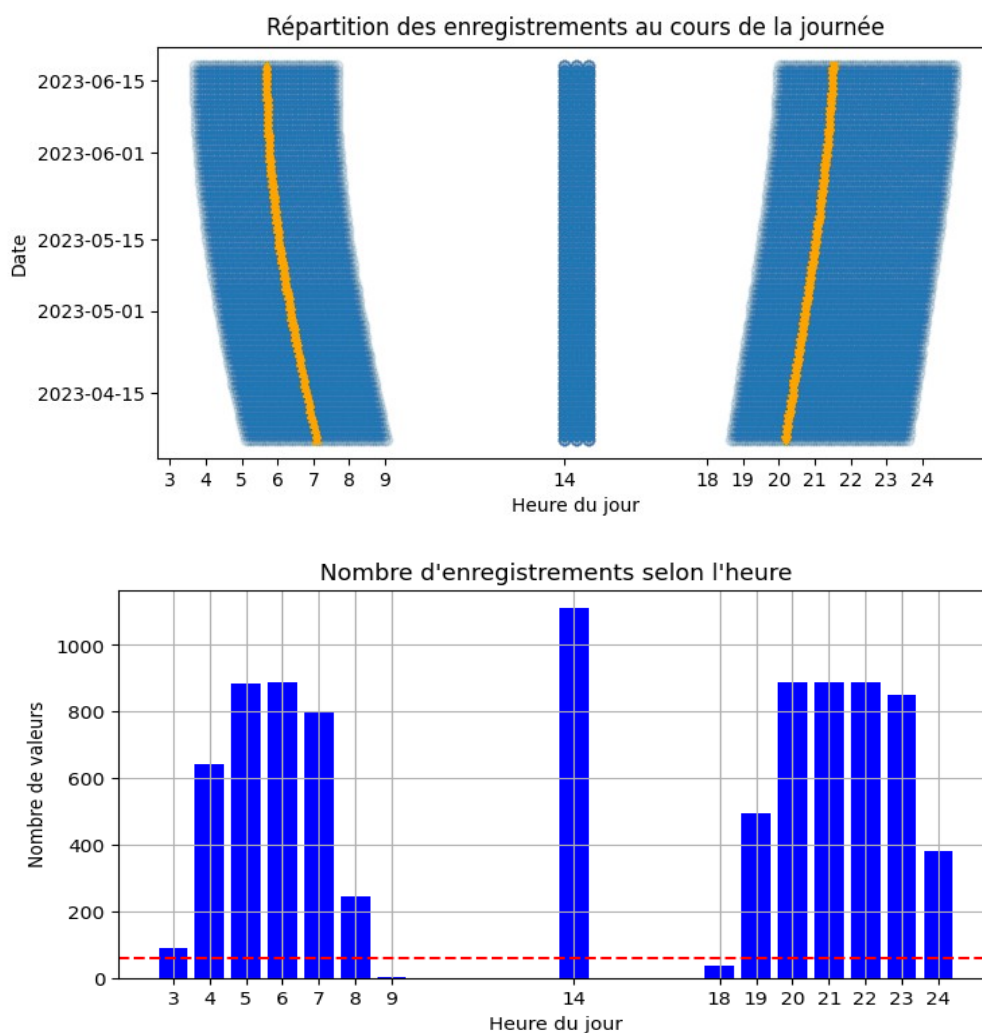


Figure 1. Répartition des enregistrements par heure du jour. Figure du haut : Chaque point bleu représente un fichier d'une minute. Le protocole d'enregistrement est calé sur l'heure de coucher et lever du soleil (bande orange). Figure du bas : le nombre d'enregistrements n'est pas identique pour chaque heure (UTC+2) du jour. Sur la plage horaire 14-15h, le nombre d'extraits utilisés correspond à 5 fois le nombre d'enregistrements car les enregistrements de 5 minutes ont été analysés par extrait d'une minute. La ligne pointillée rouge présente le seuil de 60 extraits soit 1 heure d'enregistrement.

Les enregistreurs ont été déclenchés dès le 3 avril 2023 puis déployés sur le terrain entre le 4 avril (E01 à E04) et le 5 avril (E05 à E12), ils ont été retirés le 19 juin 2023. L'analyse a été effectuée sur les enregistrements à partir du 6 avril jusqu'au 18 juin inclus (Tableau 1) afin d'exclure les journées d'installation et désinstallation des enregistreurs.

Pour chacune des placettes, 8202 fichiers (correspondant à 151.5 heures d'enregistrement et 44.7 Go) ont été utilisés dans les analyses à l'exception de la placette E03 pour laquelle l'enregistrement s'est arrêté le 5 mai 2023 (Tableau 1). En effet, de l'eau s'est infiltrée dans l'enregistreur, ce qui a oxydé les composants électroniques, endommagé l'enregistreur et stoppé l'enregistrement. La cause de cette infiltration est sûrement due à un défaut matériel ou, moins probablement, à une erreur humaine à l'installation. Au total, une base de données de 93549 fichiers audios est considérée dans cette étude, correspondant à 1728 heures d'enregistrement et formant une base de données de 510 Go.

Les enregistreurs ont été placés à 20 m du centre de chacune des placettes (repéré par un marqueur métallique superficiellement enterré et mis en place par l'ONF dans le cadre des suivis des parcelles forestières). Les microphones des enregistreurs pointaient vers le centre de la placette et étaient tous orientés vers le Sud-Ouest

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

afin de limiter l'impact du vent dominant (venant du Nord-Est) sur la membrane du microphone. Les enregistreurs ont tous été installés sur des arbres de circonférences moyennes de 98 cm (écart-type : 40 cm) à une hauteur moyenne de 255 cm (écart-type : 7 cm).

Placette	Date de début	Date de fin	Nombre de fichiers
E01	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E02	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E03	2023-04-06 05:07:00	2023-05-05 23:59:00	3327
E04	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E05	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E06	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E07	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E08	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E09	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E10	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E11	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202
E12	2023-04-06 05:07:00	2023-06-18 23:56:00	8202

Tableau 1 : Synthèse des données issues des enregistrements en 2023. Les dates de début et de fin des enregistrements analysés sont présentées pour chaque placette avec le nombre d'enregistrements total associé.

Détectabilité des signaux acoustiques

1 Théorie

Dans le cadre de suivis de biodiversité par acoustique passive, un concept central dans l'interprétation des résultats demeure la détectabilité des différentes composantes sonores. Dans le cas d'un suivi d'espèce, elle correspond à la probabilité de détecter l'espèce à l'aide d'un enregistreur acoustique passif déployé sur un site en particulier. Cette probabilité est influencée par des facteurs issus de l'acoustique physique (aire de détection notamment), du comportement animal et de l'écologie, dépendant du milieu, du protocole et de la source sonore d'intérêt. Il est important d'interpréter les résultats au regard de cette notion.

A titre d'exemple : si une espèce est détectée plus souvent sur un site A que sur un site B, il n'est pas automatique de considérer qu'un plus grand nombre d'individus se trouvent sur le site A, la probabilité de détecter l'espèce n'étant pas nécessairement identique entre les sites A et B. Concrètement, la probabilité de détecter une espèce dans un environnement bruyant est plus faible que dans un environnement calme.

2 Aire de détection

L'aire de détection d'un enregistreur est définie comme l'aire pour laquelle le signal d'intérêt émerge du bruit ambiant après s'être propagé entre l'émetteur du signal (individu d'une espèce par exemple) et l'enregistreur. Elle permet donc d'intégrer une dimension spatiale au signal d'intérêt détecté. L'aire de détection d'un enregistreur peut varier en fonction :

- de la structure du signal (fréquence, intensité). Par exemple, un signal grave (émis à fréquence basse) se propage généralement plus loin qu'un signal émis à haute fréquence ;
- des conditions météorologiques (température, humidité relative...). Par exemple, l'aire de détection peut augmenter si le vent est orienté dans la direction du microphone ;
- de la topographie de l'habitat ;
- de la végétation (densité, type) ;

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

- du type d'enregistreur acoustique passif utilisé (sensibilité, directivité) ;
- du protocole temporel d'enregistrement;
- de la position de la source et de son orientation par rapport à l'enregistreur et de la position de l'enregistreur.

Afin d'estimer l'aire de détection autour d'un enregistreur, il est courant de mener des expériences de propagation du son sur un transect à différentes distances entre un haut-parleur et l'enregistreur. Cependant, afin de respecter la réglementation des zones de quiétude mise en place (ZQFS du 15 décembre au 30 juin), aucune expérience de propagation du son n'a été réalisée. L'aire de détection des enregistreurs n'a pas été estimée.

Bien que déployés au sein du même massif forestier, il n'est pas possible de supposer une aire de détection commune aux enregistreurs de chaque placette. Cette dernière peut varier de plusieurs dizaines de mètres (Hauptert et al., 2023). Ainsi, les interprétations des résultats de détection d'espèces et de caractérisation du paysage sonore entre différentes placettes sont à considérer avec précaution. A l'image de l'exemple de l'influence de la détectabilité donné précédemment, si l'aire de détection d'un enregistreur sur un site A est plus importante que celle d'un site B, l'enregistreur placé sur le site A a plus de chance d'enregistrer des signaux différents que l'enregistreur placé sur le site B.

Dans la suite du rapport nous présentons les résultats par placette mais nous ne sommes pas en mesure d'interpréter écologiquement si une placette avec plus d'espèces détectées peut être considérée comme une placette avec une richesse spécifique plus élevée que les autres.

Méthodes d'analyse des enregistrements

Étant donné le grand nombre de données récoltées, il est nécessaire d'automatiser l'analyse pour la déployer sur l'ensemble de la base de données. Pour ce faire, nous utilisons des algorithmes d'analyse automatique afin de détecter les événements d'intérêt (vocalisations et autres signaux) et de les catégoriser (associer chaque vocalisation à une espèce ou une catégorie de sons). Si l'analyse automatique est un moyen très efficace d'optimiser le temps et les performances d'analyse, il est nécessaire d'en valider les résultats. En effet, les performances de ces outils varient en fonction de l'environnement sonore, de l'espèce d'intérêt, des conditions météorologiques, etc. Pour comprendre comment qualifier les sorties d'un algorithme, plaçons-nous dans un cas où nous souhaitons évaluer les performances d'un système de détection pour le Grand Tétrás. Si l'évènement sonore est un signal de Grand Tétrás et que :

- l'algorithme a correctement identifié l'évènement sonore comme un son de Grand tétras, l'algorithme a produit un « vrai positif » ;
- l'algorithme ne classe pas correctement l'évènement sonore et le considère comme une autre espèce, alors l'algorithme a produit un « faux négatif ».

Si l'évènement sonore n'est pas un Grand Tétrás et que :

- l'algorithme de détection a correctement identifié que ce n'était pas un Grand Tétrás, l'algorithme a donc produit un « vrai négatif » ;
- l'algorithme de détection n'a pas correctement identifié que ce n'était pas un Grand Tétrás, la sortie de l'algorithme est donc un « faux positif ».

Plusieurs approches impliquant une analyse automatique (détaillées dans la suite de ce rapport) ont été utilisées pour analyser les données selon trois des quatre objectifs du projet : caractériser la communauté d'oiseaux nicheurs de la RNNHCJ, détecter des indices acoustiques de présence de Grand Tétrás et détecter des vocalisations de Loup gris.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

1 Caractérisation de la communauté d'oiseaux nicheurs

La liste des espèces à rechercher dans l'ensemble de la base de données sonore a été définie à partir de la liste d'espèces fournie par la RNNHCJ dont nous avons extrait les noms des 88 espèces considérées comme nicheuses dans la réserve (Annexe 1). A ces 88 espèces nicheuses, 3 espèces d'intérêt : la Chouette effraie (*Tyto alba*), la Chouette chevêche (*Athene noctua*) et le Grand-duc d'Europe (*Bubo bubo*) ont été rajoutées. Parmi cette liste de 91 d'espèces, 8 sont considérées prioritaires : l'Aigle royal (*Aquila chrysaetos*), la Chevêchette d'Europe (*Glaucidium passerinum*), le Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*), la Gelinotte des bois (*Tetrastes bonasia*), le Grand Tétrás (*Tetrao urogallus*), la Nyctale de Tengmalm (*Aegolius funereus*), le Pic tridactyle (*Picoides tridactylus*) et le Venturon montagnard (*Carduelis citrinella*). La présence de chacune de ces 91 espèces a été recherchée séparément sur chaque placette.

Algorithme de détection automatique

L'algorithme de détection automatique BirdNET a été appliqué à l'intégralité du jeu de données. Cet algorithme de type *Convolutional Neural Network* (CNN) est destiné à la détection et l'identification d'espèces d'oiseaux à partir d'enregistrements sonores (Kahl et al., 2021). Initialement destinés à la classification d'images, les modèles de type CNN utilisés en acoustique passive prennent des spectrogrammes en entrée, appliquent des *couches de convolutions* destinées à condenser l'information pertinente contenue dans les spectrogrammes sous forme de vecteurs (1024 dimensions dans le cas de BirdNet - partie d'*extraction de features* du modèle). Ces vecteurs alimentent ensuite la partie *classifieur* du modèle. Pour chaque spectrogramme fourni en entrée, la partie *classifieur* retourne une liste d'espèces identifiées avec le niveau de confiance de chaque prédiction.

Le modèle BirdNET calcule des spectrogrammes sur des extraits sonores de 3 secondes, ré-échantillonnés à 48 kHz. Le modèle a été entraîné sur un grand nombre d'espèces d'oiseaux ainsi que certaines espèces de mammifères et des bruits d'origine anthropique (*i.e.* liés aux activités humaines).

La capacité d'identification d'un tel modèle peut varier d'une espèce à une autre et d'un environnement à un autre. Le niveau de bruit ambiant peut limiter la capacité des modèles à identifier correctement les espèces présentes en modifiant le rapport entre le signal recherché (le son d'intérêt) et le bruit ou en produisant des sons mal interprétés par le modèle. Par ailleurs, la présence d'espèces avec des vocalisations ressemblantes peut générer des mauvaises identifications (oiseaux imitateurs par exemple). De plus, la capacité de l'enregistreur à réceptionner un son de qualité varie dans le temps et l'espace en fonction notamment du niveau de bruit ambiant, de la topographie, de l'habitat et de la végétation. Dans ce contexte méthodologique, il est nécessaire de vérifier les identifications proposées par l'algorithme BirdNet en écoutant les enregistrements (validation manuelle).

Plusieurs paramètres peuvent être ajustés lors de l'utilisation du modèle BirdNET, dont la localisation GPS, la semaine d'enregistrement et la sensibilité sigmoïde (*Sigmoid sensitivity*). Le paramètre de sensibilité sigmoïde, en modifiant le fonctionnement de la partie « classifieur » du modèle permet de moduler sa sensibilité, c'est-à-dire la manière dont le modèle décide si une prédiction est classée comme positive ou négative. Augmenter la sensibilité sigmoïde peut permettre d'augmenter le nombre de vrais positifs, au risque d'augmenter le nombre de faux positifs et avec lui le travail de validation manuelle des résultats. L'objectif présent étant minimiser le nombre de faux négatifs pour augmenter les chances de détecter les espèces d'intérêt, après plusieurs tests du modèle, la sensibilité sigmoïde a été augmentée (valeur du paramètre retenue : 1,5). Le paramètre de géolocalisation a été testé, il applique un filtre trop restrictif aux résultats, ne couvrant pas la totalité des espèces déjà recensées, dont le Grand Tétrás, ce paramètre n'a pas été renseigné. Enfin, un score de confiance de 0.1 a été retenu comme seuil minimum pour les prédictions.

Une vérification des noms latins synonymes a été nécessaire, certaines espèces étant différemment nommées dans les sorties de l'algorithme et dans la liste d'espèces de la RNNHCJ (exemple : *Tetrastes bonasia* / *Bonasa bonasia*).

Validation manuelle des détections

Une validation manuelle a ensuite été réalisée pour chaque espèce (91 au total) et pour chaque placette (12 placettes). Pour chacun de ces 1080 (88×12) cas, les validations manuelles ont été préparées de la manière suivante :

- les extraits sonores associés aux 10 meilleurs scores de confiance répartis sur 10 fichiers différents ont été sélectionnés ;
- les extraits sélectionnés ont été rallongés de 8 secondes (4s avant et 4s après la fenêtre BirdNET de 3 secondes), soit une longueur totale de 11s ;
- les extraits ont été triés par espèce puis par placette dans des sous-dossiers ;
- l'écoute des extraits et la visualisation des spectrogrammes a été réalisée au moyen du logiciel Kaleidoscope Lite Analysis Software (Wildlife Acoustics). Les sons peuvent être écoutés autant de fois que souhaité et il est possible de naviguer de manière dynamique dans le spectrogramme ;
- la validation manuelle a été réalisée sur une base de présence/absence pour chaque espèce et chaque placette, ce qui signifie qu'un seul « vrai positif » a permis de valider l'identification d'une espèce sur une placette.

2 Détection du Grand Tétras

Dans un premier temps, l'algorithme BirdNET a été utilisé pour tenter d'identifier des vocalisations de Grand Tétras. Cette première méthode a permis d'extraire 19 enregistrements contenant des vocalisations de Grand Tétras femelle enregistrées sur les placettes E01, E05 et E06. A partir de ces 19 enregistrements, 154 segments de 3 secondes contenant des vocalisations de Grand Tétras femelle ont été extraits puis vérifiés.

De très nombreux faux positifs ont été écartés, ils contenaient quasiment tous des bruits de pluie, probablement confondus avec des vocalisations de mâles. Le bruit des gouttes de pluie sur le boîtier de l'enregistreur est très fréquemment identifié comme des vocalisations de Grand Tétras (signal harmonique et assez bref dans le temps, Figure 2).

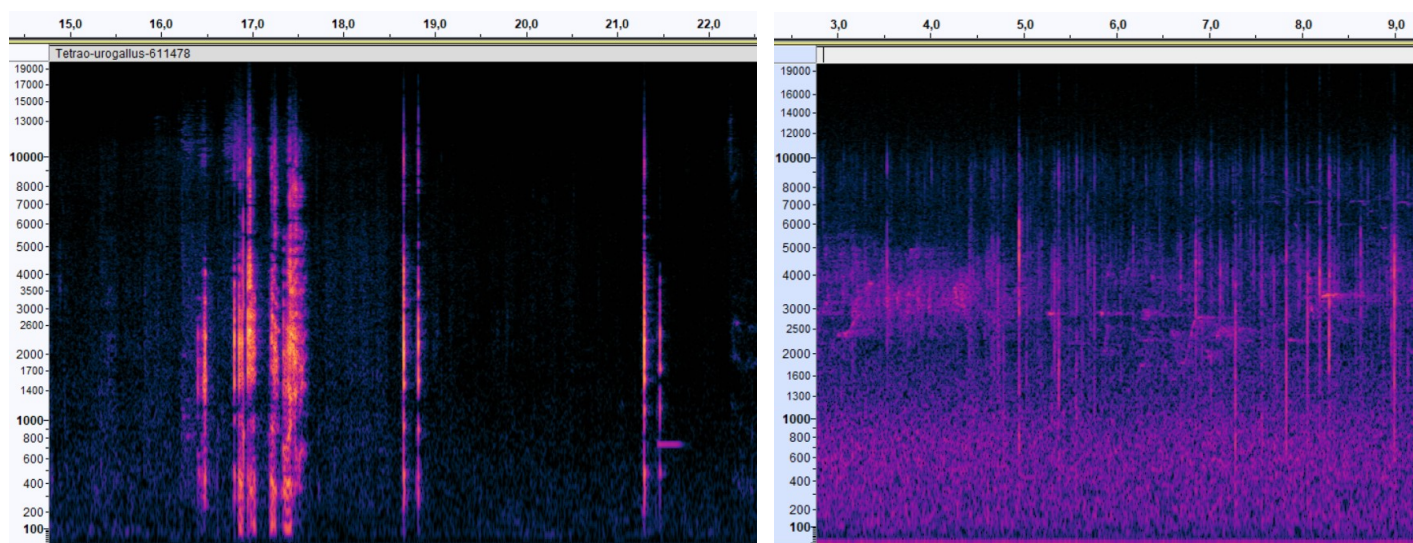


Figure 2. A gauche : Exemple d'un spectrogramme de vocalisation de Grand Tétras mâle (enregistrement sur le site web <https://xenocanto.org/>). A droite : exemple d'un spectrogramme de bruits de pluie sur le boîtier d'un enregistreur (enregistrement du 11/05/2023 sur la placette E01). Captures d'écran du logiciel Audacity.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

Une deuxième méthode a été mise en œuvre. Elle consiste à effectuer un ré-entraînement partiel du modèle à partir des données annotées obtenues lors de l'étape précédente et de vocalisations supplémentaires. Afin d'étoffer cette base de données de ré-entraînement et de créer une classe « Grand Tétrás mâle », 40 enregistrements de Grand Tétrás ont été téléchargés sur le site web <https://xeno-canto.org/>. Ces fichiers ont été annotés automatiquement en utilisant l'algorithme BirdNET puis chaque segment de 3 secondes a été validé manuellement. Cette technique a permis d'extraire 841 segments de 3 secondes contenant des vocalisations de mâles et 172 segments contenant des vocalisations de femelles.

Pour limiter les risques de confusion entre les vocalisations de Grand Tétrás et les bruits de pluie notamment, une classe de « bruit ambiant » a été créée. 1047 fichiers ont été automatiquement et aléatoirement extraits de la base de données d'enregistrement, de manière à couvrir l'ensemble des 12 placettes, des horaires et des semaines d'enregistrement. Pour chaque fichier des segments de 3 secondes ont été extraits aléatoirement. L'absence de vocalisation de Grand Tétrás sur ces extraits a été vérifiée.

La base de données de ré-entraînement d'un classifieur multi-classes a ainsi été constituée de 2 classes « positives » : Grand Tétrás femelle, Grand Tétrás mâle et une classe « négative » représentative de l'environnement sonore de la RNNHCJ, sans vocalisation de Grand Tétrás. Entraîner un modèle sur des données locales permet de prendre en compte des bruits ambiants locaux, très dépendants de la zone d'enregistrement. Ce modèle partiellement ré-entraîné a ensuite été appliqué à l'ensemble des enregistrements du projet.

3 Recherche de vocalisations de Loup gris

Une note technique détaillée a été remise à la RNNHCJ en décembre 2023 sur la recherche de vocalisations de Loup gris. Trois algorithmes destinés à la classification de sons ont été testés. Parmi ces trois algorithmes, deux modèles de classification automatique intègrent une classe « Loup » : BirdNET (Kahl et al., 2021) et YamNET (Ghani et al., 2023) : un algorithme généraliste, destiné à l'identification de sons issus de l'anthropophonie, de la biophonie et de la géophonie sur des segments de 0.96 seconde. L'algorithme BirdNET initialement destiné à la classification d'oiseaux contient plusieurs classes de canidés, ses résultats sur la classification de Loup (*Canis lupus*) et de Coyote (*Canis latrans*) sur des enregistrements d'Amérique du Nord ont récemment été publiés (Kahl et Wood, 2023). Le troisième modèle utilisé, VGGish ne propose pas de classification, mais des vectorisations en 128 dimensions, largement utilisées pour l'analyse de données sonores (Sethi et al., 2022).

Une pré-analyse des performances des algorithmes a été effectuée en appliquant les paramètres par défaut de chaque modèle puis en évaluant ses performances à travers l'écoute des enregistrements et la visualisation des spectrogrammes. Les algorithmes YamNET et VGGish n'ont pas été retenus, leurs résultats ne permettant pas une discrimination suffisamment pertinente des enregistrements.

Pour l'algorithme BirdNET, un seul enregistrement contenant des vocalisations de loups a été correctement identifié en utilisant les paramètres par défaut du modèle. Il s'agit d'un enregistrement de 60 secondes venant de la placette 10, le 4 avril 2023 à 20h08. Différents niveaux de sensibilité (*sigmoid sensitivity*) ont été testés. L'argument de géolocalisation (coordonnées GPS) n'a pas été utilisé, les mammifères n'étant pas présents sur la liste restreinte par zone géographique.

Pour cette recherche de vocalisations de loups, plusieurs classes faisant référence à des canidés ont été extraites des sorties du modèle : « *Canis lupus* », « *Canis latrans* » (coyote) et « Dog » (Chien, *Canis lupus familiaris*) pour comparer les vocalisations détectées avec le répertoire vocal du Loup (Figure 3).

L'aire de répartition du Coyote (*C. latrans*) se trouve en Amérique du Nord, mais cette espèce ayant des vocalisations proches de celles des Loups gris et du Chacal doré (*C. aureus*), les sorties de cette classe ont été compilées et écoutées. Ces sorties ont été validées manuellement en fixant un seuil de confiance à 0.3 pour les

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

classes « *C. lupus* » et « *C. latrans* » et 0.5 pour la classe « Dog ». La validation manuelle a été réalisée par 3 personnes puis les résultats ont été croisés. L'intégralité du jeu de données a été analysé suivant cette méthode.

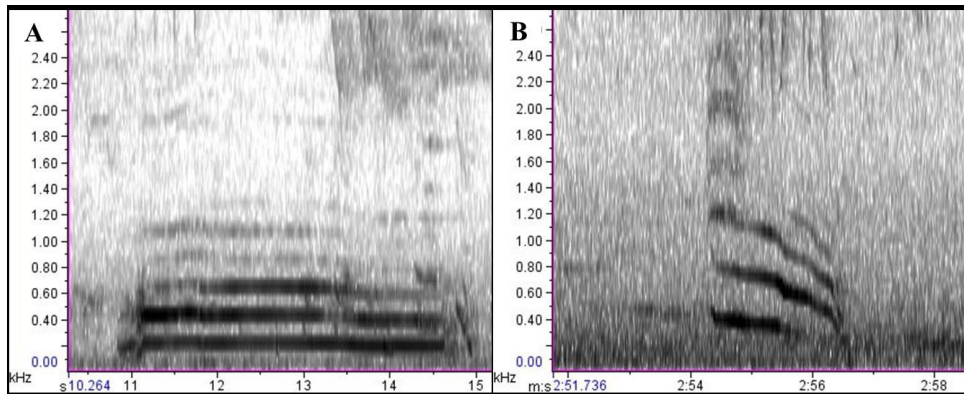


Figure 3. Exemples de spectrogrammes de hurlements de Loup gris considérés comme « plat » (A) ou modulé en fréquence et en amplitude (B). Parc Animalier de Sainte Croix – 2014, dans Papin, 2018.

Les vectorisations issues de l'algorithme BirdNET ont été comparées selon leurs similarités cosinus (*cosine similarity*) avec les vocalisations identifiées le 8 avril (voir la Note technique, BioPhonia, 2023). Deux passages ont été effectués, le premier en prenant comme référence les vectorisations des segments contenant les vocalisations de Loup seul et le second en prenant comme référence les vectorisations des segments contenant des vocalisations de Loup et des chants d'oiseaux. La similarité cosinus est l'une des méthodes utilisées pour la comparaison de vecteurs en grande dimension. Les enregistrements présentant les plus fortes similarités ont été écoutés pour une identification manuelle. L'analyse des vectorisations a été réalisée sur les placettes E09, E10 et E11.

4 Analyse des paysages sonores

Afin de permettre une analyse quantitative des paysages sonores enregistrés, des descripteurs appelés indices écoacoustiques ont été développés par des chercheurs spécialistes de ce domaine scientifique (Sueur et al., 2014, Alcocer et al., 2022). Par le biais de formules mathématiques appliquées au signal sonore, ces indices permettent d'effectuer une réduction de dimension d'un échantillon de paysage sonore à une valeur. De nombreux indices écoacoustiques basés sur différentes caractéristiques du signal ont été développés au cours de ces dernières années. En se basant sur différents travaux scientifiques proches de l'étude présentée dans ce rapport et de l'interprétabilité des indices, nous avons sélectionné 3 indices écoacoustiques, détaillés dans le Tableau 2.

Les résultats présentés dans ce rapport sont issus des spectrogrammes et des indices calculés sous Python (version 3.10.13) à l'aide du package *scikit-maad* (<https://scikit-maad.github.io/>) dédié à l'analyse de paysages sonores. Dans un objectif de répétabilité, les paramètres utilisés sont listés ici :

- Paramètres des spectrogrammes : *nperseg* = 1024 ;
- MED : *mode* = 'fast', *Nt* (taille de chaque fenêtre) = 512 points ;
- NDSI : *flim_bioPh* = (1000,10000), *flim_antroPh* = (0,1000), *R_compatible* = None;
- BI : *flim* = (2000,15000), *R_compatible* = None.

Nom de l'indice	Référence	Description
Median of the envelope MED	-	MED est la médiane de l'enveloppe de la forme d'onde. L'indice MED a des limites de 0 à 1. Des valeurs plus élevées (plus proches de 1) indiquent des paysages sonores qui sont plus forts en moyenne.
Normalized Difference Soundscape Index NDSI	Kasten et al. 2012	LE NDSI s'appuie sur une répartition théorique des bandes de fréquences entre l'anthropophonie et la biophonie. Le rapport entre les deux composantes donne des valeurs de -1 à +1, +1 indiquant l'absence d'anthropophonie dans le paysage sonore.
Bioacoustic Index BI	Boelman et al. 2007	Le BI est estimé en fonction de l'amplitude des bandes de fréquences au sein d'une certaine bande de fréquences (2 et 11 kHz par exemple). La valeur est relative à la bande de fréquences la plus silencieuse ; des valeurs plus élevées indiquent une plus grande disparité entre les bandes les plus fortes et les plus silencieuses. Dans certains cas, le BI est considéré comme un indicateur de la richesse et de l'abondance des oiseaux.

Tableau 2. Présentation des indices écoacoustiques utilisés.

Un échantillonnage dédié à l'étude de la pollution sonore a été réalisé en milieu de journée entre 14 et 15h. Ces enregistrements totalisent 15 minutes par jour réparties en enregistrements de 5 minutes. Afin de standardiser le calcul des indices écoacoustiques entre les enregistrements du matin et du soir (durée 1 minute) et du milieu de journée (durée 5 minutes), les indices ont systématiquement été calculés sur des segments de 60 secondes.

Afin de connaître l'évolution des indices écoacoustiques au cours d'une journée, la moyenne de chaque indice par heure de la journée a été calculée avec l'erreur standard associée. L'erreur standard est une mesure de l'incertitude associée aux valeurs moyennes calculées. Elle diminue proportionnellement au nombre d'échantillons, dans ce cas, d'extraits sonores enregistrés.

Les horaires de début et de fin d'enregistrement étant calés sur les heures de lever et de coucher du soleil, le nombre d'enregistrements par heure (UTC +2) varie au cours de la période d'enregistrement. Seuls 2 extraits ont été enregistrés entre 9 et 10 h, et 37 extraits entre 18 et 19h (Figure 1). Ces 2 horaires ont été exclus de l'analyse par heure du jour pour ne prendre en compte que les horaires ayant un minimum de 60 réplicats (soit 1h d'enregistrement) dans le calcul des moyennes.

Caractérisation de la communauté d'oiseaux nicheurs

Parmi les 91 espèces nicheuses recherchées, 65 espèces ont été identifiées sur le territoire de la RNNHCJ, entre 34 et 46 pour chacune des placettes (Figure 4, Tableau 4). Chacune des espèces prioritaires suivantes a pu être détectée à l'échelle de la RNNHCJ : l'Aigle royal (*Aquila chrysaetos*), la Chevêchette d'Europe (*Glaucidium passerinum*), le Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*), la Gelinotte des bois (*Tetrastes bonasia*), le Grand Tétras (*Tetrao urogallus*), la Nyctale de Tengmalm (*Aegolius funereus*), et le Venturon montagnard (*Carduelis citrinella*). Le Pic tridactyle (*Picoides tridactylus*) semble avoir été détecté sur la placette E07, cette identification est toutefois difficile à confirmer. A l'échelle de la placette entre 0 (E12) et 6 espèces prioritaires (E01) ont été identifiées (Figure 4, Tableau 4).

L'étape de validation a permis notamment d'identifier plusieurs sources de mauvaises identifications par l'algorithme dont les imitations variées de la Grive musicienne *Turdus philomelos*, du Rouge-Gorge familier *Erithacus rubecula*, la variété des cris de mésanges, mais aussi des artefacts dus à la météo. Comme présenté dans le chapitre Méthodes de ce rapport, le bruit des gouttes de pluie sur les boîtiers des enregistreurs a été confondu par l'algorithme avec certaines espèces d'oiseaux dont le Grand Tétras (Figure 2) et le Sizerin flammé, espèce dont la présence n'a pas été confirmée.

Détection du Grand Tétras

Les données historiques fournies par la RNNHCJ recensent des détections de Grand Tétras sur 6 placettes (E01, E05, E06, E07, E09 et E11), à différentes dates (Tableau 4). Une place de chant encore active et vraisemblablement assez mobile se trouve à proximité de la placette E05. Les enregistrements acoustiques ont effectivement permis de détecter la présence de Grands Tétras sur la placette E05 ainsi que sur les placettes E01 et E06 (Tableau 3). Les individus détectés sont quasi exclusivement des femelles. Une des hypothèses permettant d'expliquer ce déséquilibre est la difficulté observée du modèle à différencier des bruits ambiants (pluie, craquements, etc.) avec les vocalisations des mâles. Le ré-entraînement partiel réalisé a permis d'identifier de nouvelles vocalisations, sans améliorer la capacité du modèle à détecter les vocalisations des mâles.

Placette	Jour	Heure	Détection
E01	27/05/2023	20h15	Grand Tétras femelle
E05	27/04/2023	entre 6h24 et 6h29	Grand Tétras femelle
	30/04/2023	entre 5h59 et 6h14	Grand Tétras femelle + mâle
	07/05/2023	5h39	Grand Tétras femelle
	14/05/2023	entre 5h44 et 5h54	Grand Tétras femelle
	22/05/2023	20h55	Grand Tétras femelle
E06	11/05/2023	entre 6h03 et 7h03	Grand Tétras femelle

Tableau 3. Synthèse des détections de Grand Tétras par acoustique. Les résultats proviennent de l'utilisation du modèle BirdNET ainsi que du ré-entraînement partiel du modèle. La colonne « heure » indique l'heure de début des enregistrements sur lesquels des Grands Tétras ont été détectés, lorsqu'un intervalle est indiqué, plusieurs fichiers successifs contiennent des vocalisations vérifiées de Grand tétras.

Espèces d'oiseaux nicheurs identifiées - 1/2



Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Sualello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

Espèces d'oiseaux nicheurs identifiées - 2/2

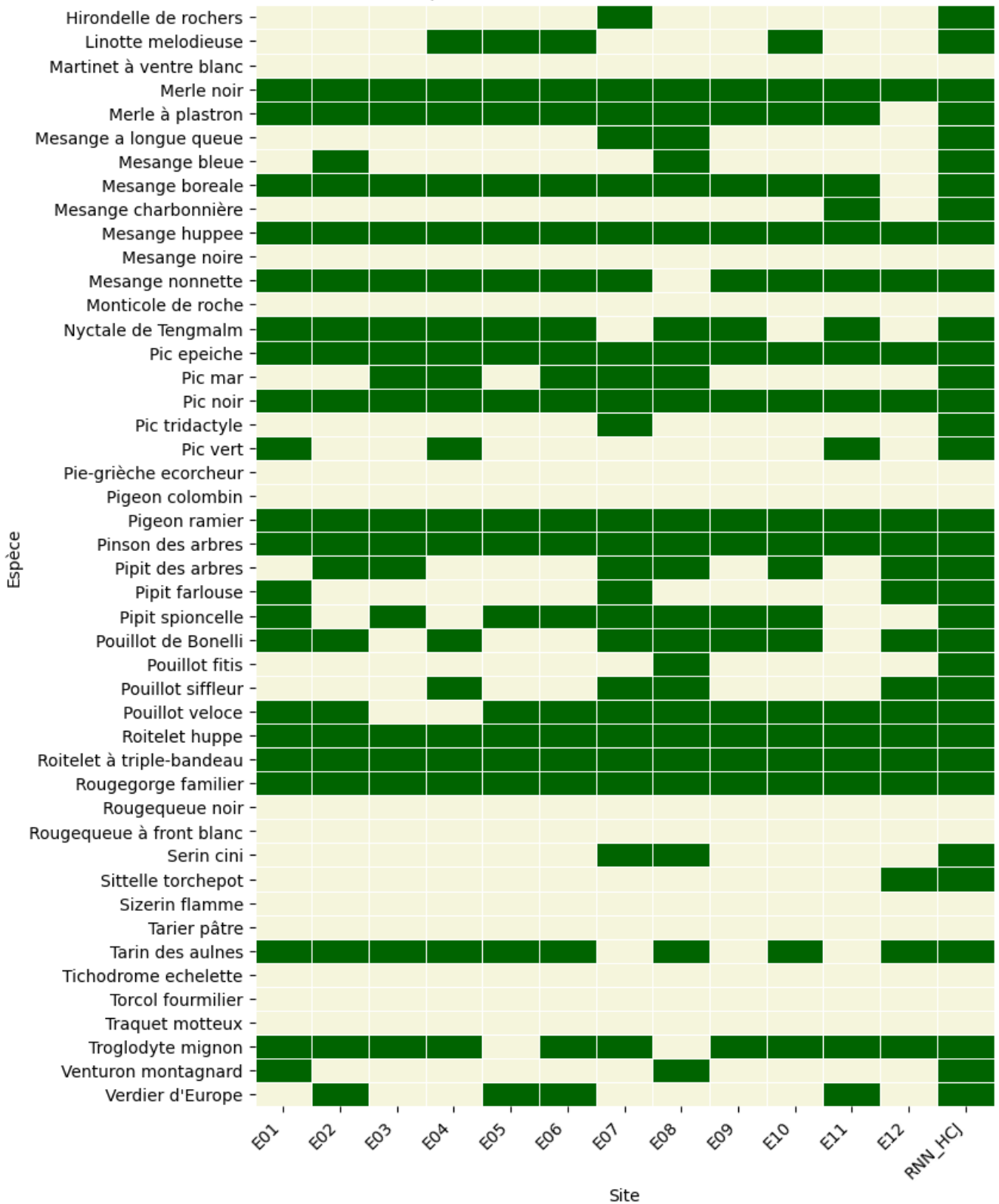


Figure 4. Synthèse des résultats d'identification par acoustique des espèces d'oiseaux nicheurs, par espèce et par placette. Les cellules colorées en vert indiquent la détection de l'espèce, les cellules non colorées, l'absence de détection de l'espèce.

	Sources d'anthropophonie identifiées	ZQFS	Altitude (m)	Volume de bois vivant	Grand Tétrras		Nombre d'espèces nicheuses détectées	
					Contact historique	Contact acoustique	Total (91)	Prioritaires (8)
E01	Fréquentation hivernale des sommets, route départementale en contre-bas, sentiers	Oui	1439	260	2015	Oui	43	6
E02	Fréquentation des sommets, station de ski en contre-bas, sentiers	Oui	1325	450	-	-	38	3
E03	Sentier autorisé pendant la ZQFS et route forestière	Oui	1429	410	-	-	34	2
E04	Route forestière et route départementale en contre-bas	Non	1280	370	-	-	40	3
E05	Sentier de randonnée pour l'accès aux sommets, route départementale en contre-bas	Oui	1459	360	2009	Oui	39	4
E06	Route forestière pratiquée en été et hiver, route départementale en contre-bas	Oui	1411	390	2006	Oui	42	4
E07	Sentier très actif et proximité avec une route départementale (~ 541m) très fréquentée	Oui	1453	150	< 1995	-	46	3
E08	Sentier de randonnée actif pendant ZQFS, passage probable sur la route forestière (~ 100 m)	Oui	1353	350	-	-	44	3
E09	Route forestière damée pour le ski de fond, route départementale et site de la Vattay (~ 1500 m)	Oui	1394	290	2011	-	36	2
E10	Route forestière damée pour le ski de fond, route départementale et site de la Vattay (~ 1365 m)	Oui	1310	240	-	-	37	2
E11	Route forestière damée pour le ski de fond, proximité directe alpage	Oui	1359	440	2006	-	37	4
E12	Route forestière fermée hors professionnels en ZQFS (mais nombreuses infractions), ouverte aux piétons à partir de mai	Non	1171	250	-	-	37	0

Tableau 4. Synthèse des résultats d'identification des espèces d'oiseaux nicheurs par placette. Les informations sur la géographie, la réglementation, l'environnement des placettes et la date de dernier contact du Grand Tétrras nous ont été communiquées par la RNNHCJ. Les renseignements présents dans les colonnes « contact acoustique » de Grand Tétrras et « nombre d'espèces nicheuses détectées » sont des résultats de l'étude présente.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Sualello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

Détection de vocalisations de Loup gris

Les identifications automatiques des classes « Dog », « *Canis lupus* » et « *Canis latrans* » issues du modèle BirdNET ont été écoutées.

En parallèle, une analyse complémentaire a été menée afin de rechercher des vocalisations de loup supplémentaires. Cette méthode porte sur l'analyse des similarités cosinus entre les vecteurs (embeddings) produits par BirdNET. Cette analyse a permis d'identifier de nouvelles vocalisations, notamment la vocalisation du 4 avril à 20h08 enregistrée depuis la placette 11. Ces résultats ont été croisés avec les sorties du classifieur BirdNET.

Après validation manuelle, aucun des enregistrements identifiés comme des chiens par BirdNET ne contenait de vocalisation de Loup gris, certaines confusions notamment avec le Grand Corbeau ont été relevées. L'écoute des extraits identifiés comme Loup ou coyote par BirdNET ainsi que la recherche par similarité cosinus a permis de repérer 6 enregistrements contenant des vocalisations identifiées ou probables de Loup. Une étape de validation supplémentaire a été effectuée par la RNNHCJ, permettant d'écarter certains enregistrements (Tableau 5).

De nombreuses confusions avec des sons d'avions, de moteurs (voiture ou moto) et de cloches de bétail ont été observées, de même qu'avec certaines vocalisations d'oiseaux. Ces sources sonores peuvent paraître très différentes à première vue mais leur structure acoustique (régimes plutôt stationnaires, gammes de fréquences, harmonicité élevée) permet d'expliquer en première approche ces confusions.

Placette	Jour	Heure	Détection	Validation par la RNNHCJ
E10	08/04/2023	20:08	Loup	oui
E09	08/04/2023	20:08	Loup	oui
E10	10/04/2023	05:04	Loup	non (chiens de traîneau sur Mijoux)
E07	15/06/2023	03:48	Loup	oui
E10	07/05/2023	04:24	Loup à confirmer	non (chiens de traîneau sur Mijoux)
E11	26/04/2023	23:27	Loup à confirmer	non (chiens de traîneau sur Mijoux)

Tableau 5. Synthèse des résultats d'identification de Loup. La colonne « Détection » liste les identifications acoustiques considérées comme probables, la validation de chaque enregistrement réalisée par la RNNHCJ est présentée dans la colonne « Validation par la RNNHCJ ».

Analyse des paysages sonores

Différents indices écoacoustiques ont été utilisés pour caractériser l'évolution des paysages sonores entre avril et mai sur chacune des 12 placettes. Les 3 indices sélectionnés ne sont pas ou faiblement corrélés entre eux : l'indice MED n'est pas corrélé aux autres indices (coefficient de corrélation < 0,1) tandis que les indices BI et NDSI sont faiblement et négativement corrélés (coefficient de corrélation de -0,19). Les résultats fournis par ces trois indices sont ainsi complémentaires car peu redondants (Figure 5).

Par ailleurs, l'enregistreur de la placette E03 s'étant arrêté prématurément le 5 mai, les résultats issus de cette placette ne sont pas directement comparables aux résultats des autres placettes.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
Sualetto, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

A l'échelle de la RNNHCJ, l'environnement sonore semble homogène avec des tendances générales similaires et une distribution des valeurs d'indices proche entre les placettes. De légères variations sont toutefois visibles entre les valeurs médianes ou moyennes des indices d'une placette à l'autre (Figures 6 à 8). Les paragraphes suivants sont destinés à détailler l'évolution des résultats dans le temps et entre sites.

Avant de présenter les résultats obtenus, il est intéressant de rappeler que les indices écoacoustiques sont des outils permettant de décrire les paysages sonores, toutefois, des précautions sont à prendre lors de l'interprétation des résultats. Comme le relèvent Bradfer-Lawrence et al. (2019) dans leur publication :

(i) des sons d'origines différentes peuvent produire des signatures spectrales proches et des valeurs d'indices similaires. Dans le cas présent, nous avons observé la similitude des signatures spectrales entre les bruits de pluie sur les boîtiers et certaines vocalisations d'avifaune (Figure 2) ;

(ii) les indices sont calculés en supposant que la fréquence des sons enregistrés renseigne sur leur origine. Pour le NDSI, le ratio entre anthropophonie et biophonie repose sur l'hypothèse que l'anthropophonie émet dans la bande de fréquence 1-2 kHz et la biophonie entre 2 et 8 kHz. Selon les contextes et les espèces, la biophonie peut émettre dans des fréquences plus basses et des activités anthropiques à des fréquences plus hautes (moteurs, sirènes, etc.) ;

(iii) les réponses à une perturbation (modification du milieu, activités anthropiques,...) peuvent varier entre taxons ou entre régions, il n'est souvent pas possible de décrire une réponse type à une perturbation donnée, il faut donc être prudent dans l'utilisation des indices à des fins de comparaison.

Ainsi, les indices acoustiques sont une prise ponctuelle d'information dans un contexte de paysage sonore hautement variable. La relation entre indicateurs écologiques et indices acoustiques est donc à décrire au cas par cas (Sethi, 2023 ; Allen-Ankins, 2023). Il est aussi recommandé au vu de la variabilité des paysages sonores et de la complexité des processus écologiques étudiés de considérer une approche avec un ensemble d'indices acoustiques (Gaspard et al. 2023 ; Ross et al. 2023).

1 Evolution temporelle des indices écoacoustiques, tendances générales

L'indice MED est un indicateur de l'intensité sonore, toutes fréquences confondues. Des valeurs plus élevées sont associées à des sons ayant des intensités plus élevées (plus forts). Cet indice ne renseigne pas sur l'origine supposée des sons. Les résultats obtenus montrent un indice MED caractérisé par des pics plus ou moins marqués selon les placettes, en dehors desquels les valeurs sont basses et constantes au cours de la période d'enregistrement (Figure 6). L'indice MED est corrélé à la vitesse du vent (coefficient de corrélation de 0.54, Figure 5) mais pas à l'intensité des précipitations (coefficient de corrélation de 0.12). Les valeurs d'indice MED calculées en milieu de journée (Figure 8) confirment l'homogénéité des valeurs entre sites, avec cependant des niveaux médians et une amplitude d'intensité sonore légèrement plus élevés enregistrés sur les placettes E01, E07, E11 et E12 que sur les autres. Les valeurs atypiques (non représentées sur la Figure 8) ont été calculées lors d'épisodes de vent intense ou d'orage.

L'indice NDSI présente le rapport théorique entre biophonie et anthropophonie. Les valeurs positives sont indicatrices de paysages sonores dominés par la biophonie et les valeurs négatives de paysages sonores dominés par l'anthropophonie. La tendance générale est une augmentation des valeurs de NDSI entre avril et juin (Figures 6 et 8).

Au mois d'avril, les valeurs médianes du NDSI calculées sur les enregistrements réalisés entre 14 et 15 h sont négatives sur toutes les placettes, ce résultat oriente vers un paysage sonore dominé par l'anthropophonie. Au mois de mai, les médianes deviennent positives sur les placettes E01 et E11

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
Sualetto, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

(respectivement 0.5 et 0.2), sont légèrement négatives sur les placettes E02, E04, E05, et E08 et restent basses sur les placettes E03 et E12. Le rapport entre anthrophonie et biophonie continue de s'inverser entre mai et juin, seules les placettes E06, E09 et E12 conservent des valeurs négatives en juin.

Des corrélations semblent exister entre l'indice NDSI et les conditions météorologiques (Figures 5 et 6). Les épisodes de vent fort semblent être associés à des valeurs plus faibles de NDSI (coefficient de corrélation faible mais négatif de -0.23) tandis que les pics de précipitations sont corrélés à des valeurs positives de NDSI (coefficient de corrélation faible de 0.32). L'effet des conditions météorologiques sur les indices dont le NDSI est documenté (Sánchez-Giraldo et al., 2020), cependant, le pattern observé au mois de mai (NDSI plus fort début mai durant l'épisode de pluie et plus faible fin mai durant l'épisode de vent) est aussi cohérent avec la biologie des espèces enregistrées.

Début mai, la grande majorité des oiseaux migrateurs est arrivée, et la majorité des espèces est en phase de reproduction, d'installation ou de recherche de femelle, cette période est associée à une forte activité vocale. Durant la deuxième quinzaine du mois de mai, une baisse de l'activité vocale peut correspondre à la phase de couvainon.

L'indice BI ne considère que la bande de fréquences entre 2 et 11 kHz, fréquences associées à la biophonie. Un indice BI élevé indique une plus grande disparité entre les fréquences les plus fortes et les plus silencieuses (entre 2 et 11 kHz), soit une utilisation moins homogène des fréquences entre 2 et 11 kHz qui serait corrélée à une plus faible biodiversité. Au contraire, un indice bas indique une utilisation homogène des différentes fréquences, ce qui peut être le cas lorsque de nombreuses espèces vocalisent en même temps, chacune ayant leur propre signature spectrale et donc une utilisation différente des bandes de fréquence.

Comme les indices précédents les valeurs de BI ne présentent pas une grande variabilité entre placettes. On peut noter deux tendances : une diminution de l'amplitude des valeurs (Figures 6 et 8) ainsi qu'une légère baisse des valeurs moyennes (Figure 6 et médianes de l'indice Figure 8) d'avril à juin. Ces résultats sont cohérents avec l'évolution des valeurs de NDSI et une augmentation de la biophonie entre avril et juin dans la RNNHCJ. Bien qu'aucune corrélation ne soit identifiée entre BI et le cumul de précipitations (Figure 5), les valeurs maximales de BI (valeurs atypiques non représentés sur la Figure 8), ont été calculées lors d'épisodes de pluie intense.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
Suaello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

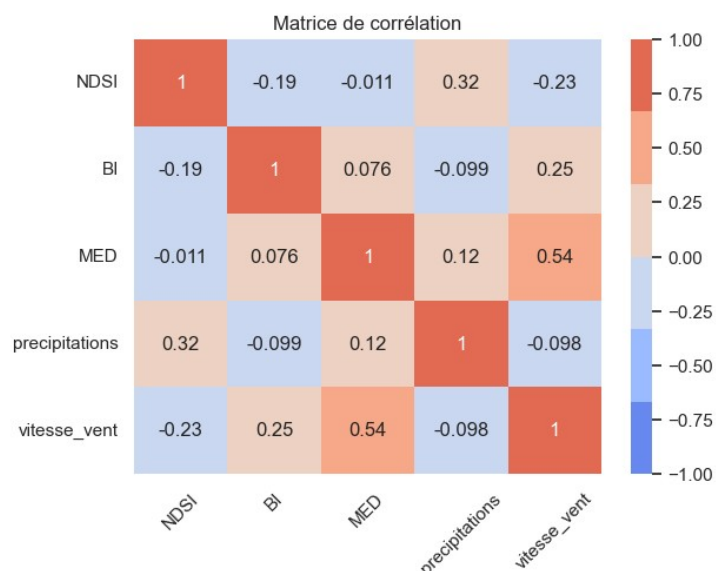


Figure 5. Matrice de corrélation entre indices écoacoustiques (NDSI, BI, MED), vitesse du vent et niveau des précipitations. Les coefficients de corrélation de Pearson sont inscrits dans chaque cellule et leur niveau est représenté selon l'échelle de couleur à droite.

2 Evolution des valeurs d'indices écoacoustiques au cours de la journée

L'évolution au cours de la journée est différente pour chacun des trois indices (Figures 7 et 8) :

- Les valeurs de MED sont les plus basses à 3h, augmentent autour de l'heure de lever du soleil, puis tendent à décroître en milieu de journée. Les comportements de l'indice sont variables entre placettes en fin de journée. Certaines placettes comme la E06 et E09 sont caractérisées par des valeurs faibles, au contraire les placettes E07 et E11 sont caractérisées par un environnement sonore plus intense en moyenne et plus variable (taille des boîtes sur la Figure 8). La placette E07 est à proximité d'une route départementale très fréquentée, la placette E11 d'une route forestière damée pour la pratique du ski de fond et d'un alpage (Tableau 4).
- Les valeurs de NDSI sont majoritairement négatives, à l'exception (i) d'un pic le matin, correspondant au chorus matinal des oiseaux, qui permet à toutes les placettes d'atteindre des valeurs positives et (ii) d'un pic le soir, correspondant au chorus du soir, qui ne permet qu'aux placettes E01, E10 et E11 d'atteindre des valeurs positives. A l'opposé les placettes E07, E09 et E11 présentent les valeurs de NDSI les plus faibles, caractéristiques d'un paysage sonore dominé par l'anthropophonie (Figures 7 et 8).
- Les valeurs minimales de BI, potentiellement associées à une plus grande diversité en espèces sont observées autour de l'heure de lever du soleil et, dans une moindre mesure, autour du coucher du soleil. Ces résultats sont cohérents avec la répartition des valeurs de NDSI et avec la présence des chorus du matin et du soir. La placette E07 se distingue des autres sites par des valeurs de BI systématiquement plus basses, possiblement liées à la plus grande diversité en espèces identifiées (Tableau 4 et Figure 8).

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

3 Variabilité entre les placettes

Si les paysages sonores semblent similaires entre les placettes de la RNNHCJ, quelques différences dans le comportement des indices sont toutefois identifiables.

Le site E01 est notamment caractérisé par des valeurs médianes de NDSI plus élevées et plus largement positives (0.5) à partir de mai, un indice BI bas et un indice MED de niveau intermédiaire. Ces résultats indiquent une placette dont le paysage sonore semble être dominé par la biophonie.

A l'opposé, les sites E06, E09 et E12 présentent des valeurs de NDSI plus basses et de BI légèrement plus hautes, suggérant un ratio moins favorable à la biophonie. Ces résultats sont intéressants à mettre en regard de ceux présentés dans le Tableau 4 puisque 42 espèces d'oiseaux (dont 4 prioritaires) ont été détectées sur le site E06 alors que seulement 36 espèces (dont 2 prioritaires) et 37 espèces (sans aucune détection d'espèce prioritaire) ont été détectées sur les sites E09 et E12.

La placette E07 présente un comportement légèrement différent associant des valeurs de BI et de NDSI basses et des intensités sonores plus variables en milieu de journée. Ces résultats suggèrent un paysage sonore à la fois riche en biodiversité mais influencé par l'anthropophonie. La présence d'une route départementale très fréquentée et un peuplement végétal moins dense en gros bois (Tableau 4) pourraient expliquer ces résultats.

Espèces d'oiseaux détectées et indices écoacoustiques

Au vu des précédents résultats, il semble pertinent de mettre en regard les espèces d'oiseaux nicheurs détectées et les indices écoacoustiques permettant de décrire les paysages sonores.

Une corrélation positive attendue est observée entre le nombre d'espèces nicheuses et le nombre d'espèces prioritaires identifiées (coefficient de corrélation : 0.49). Une corrélation négative est mise en évidence entre les valeurs médianes de BI et le nombre d'espèces nicheuses identifiées (coefficient de corrélation : -0.45) et plus faiblement entre les valeurs médianes de BI et le nombre d'espèces prioritaires (-0.31). L'indice NDSI médian apparaît uniquement corrélé au nombre d'espèces prioritaires identifiées (coefficient de corrélation : 0.40), mais pas au nombre d'espèces nicheuses (coefficient de corrélation : -0.05), ce qui constitue un résultat moins attendu.

D'une manière générale, les valeurs des coefficients de corrélation restent faibles, potentiellement à cause de l'absence de répliqués temporels, les corrélations n'ont pu être calculées qu'à partir d'une valeur médiane d'indice et de richesse en espèces nicheuses par placette pour l'intégralité de la période d'enregistrement.

Cependant ces premières tendances renforcent l'idée d'un lien entre richesse spécifique et indice BI (une surreprésentation des fréquences associées à la biophonie quand le nombre d'espèces augmente, Tableau 2) et ouvrent des pistes à explorer pour comprendre la relation entre l'indice NDSI et le nombre d'espèces prioritaires présentes sur un site : (i) les espèces prioritaires ont-elles un comportement vocal de nature à influencer les valeurs NDSI ? c'est-à-dire renforcer le ratio entre biophonie et anthropophonie, et (ii) la présence des espèces prioritaires constitue-t-elle un indicateur de meilleur état du milieu ? qui se traduirait par un rapport plus favorable entre biophonie et anthropophonie, soit des valeurs plus élevées de NDSI.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

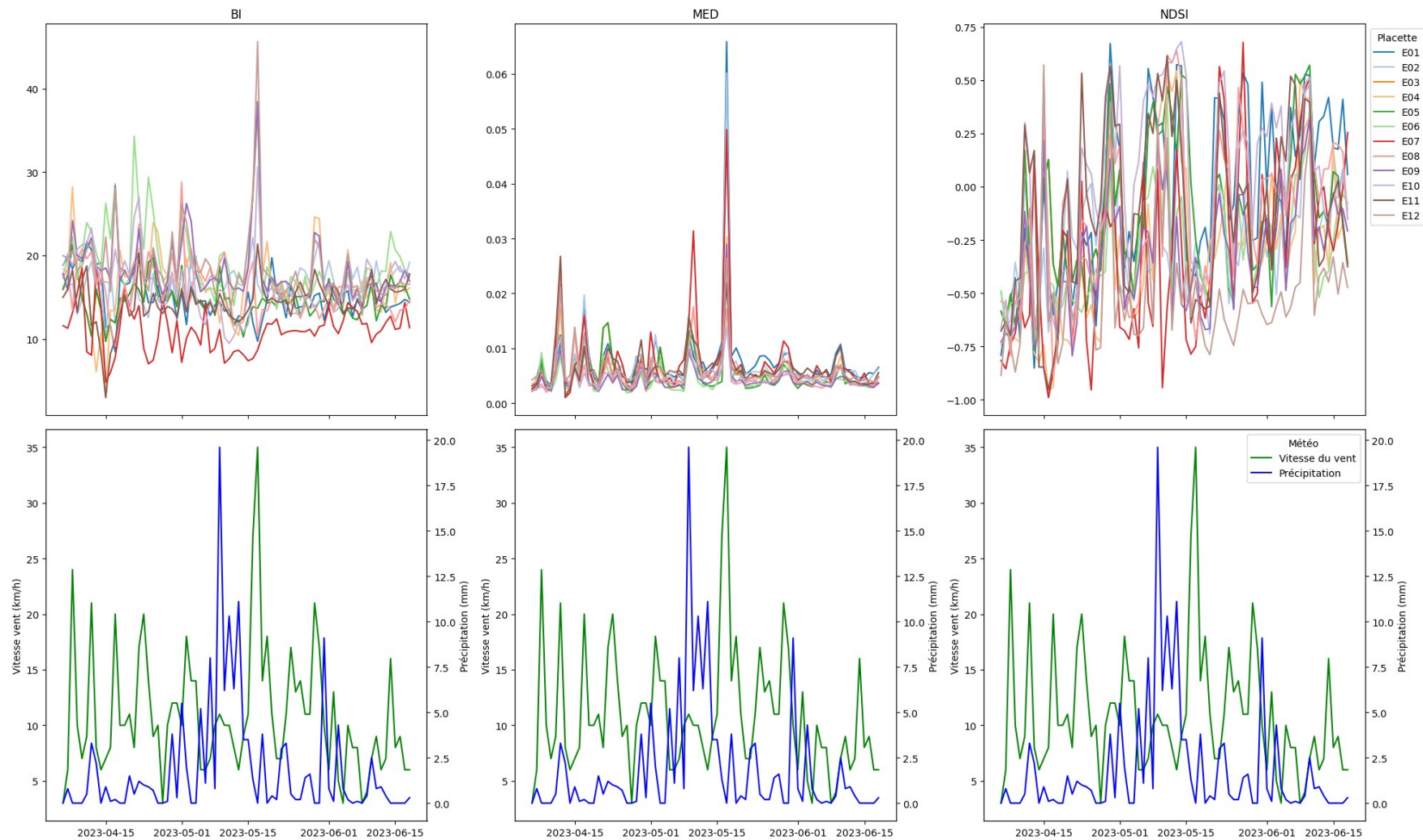


Figure 6. Evolution des valeurs médianes par jour des indices BI, MED et NDSI entre avril et mai. Chaque placette est représentée selon le code couleur présenté en haut à droite. Les graphiques du bas présentent le cumul de précipitations (en mm/jour) et la vitesse maximale du vent (km/h) pour chaque jour d'enregistrement, les données sont issues de la station météo de La Pesse.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Sualello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

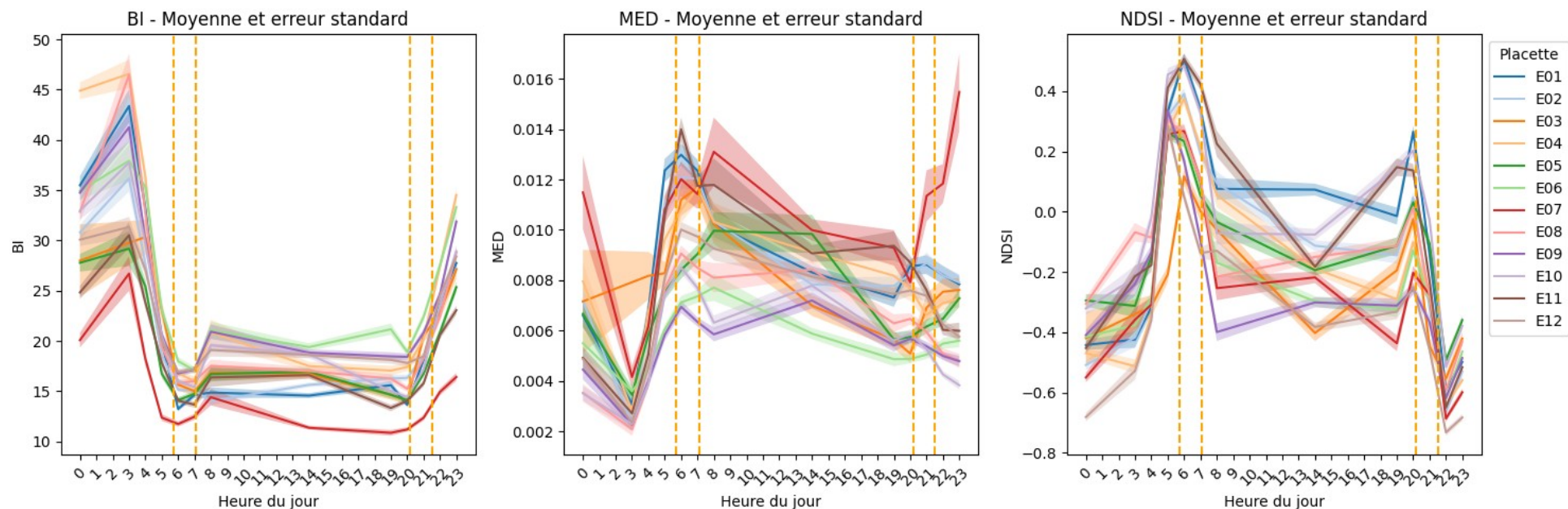


Figure 7. Evolution des valeurs moyennes des indices Bi, MED et NDSI au cours de la journée. Les moyennes ont été calculées sur l'ensemble de la période d'enregistrement, pour chaque heure du jour (UTC+2) et sont présentées avec leur erreur standard (ombres colorées). L'erreur standard est une mesure d'erreur associée à la moyenne calculée sur un échantillon. Cet intervalle tend à diminuer lorsque le nombre d'échantillons utilisés dans le calcul de la moyenne augmente. Dans un souci de clarté de lecture des courbes, les résultats sont présentés en ligne continue, mais la résolution temporelle est identique à celle du protocole d'enregistrement présenté en Figure 2. Les barres verticales en pointillés oranges représentent l'évolution des heures de lever et de coucher du soleil entre le début et la fin des enregistrements.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Sualello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

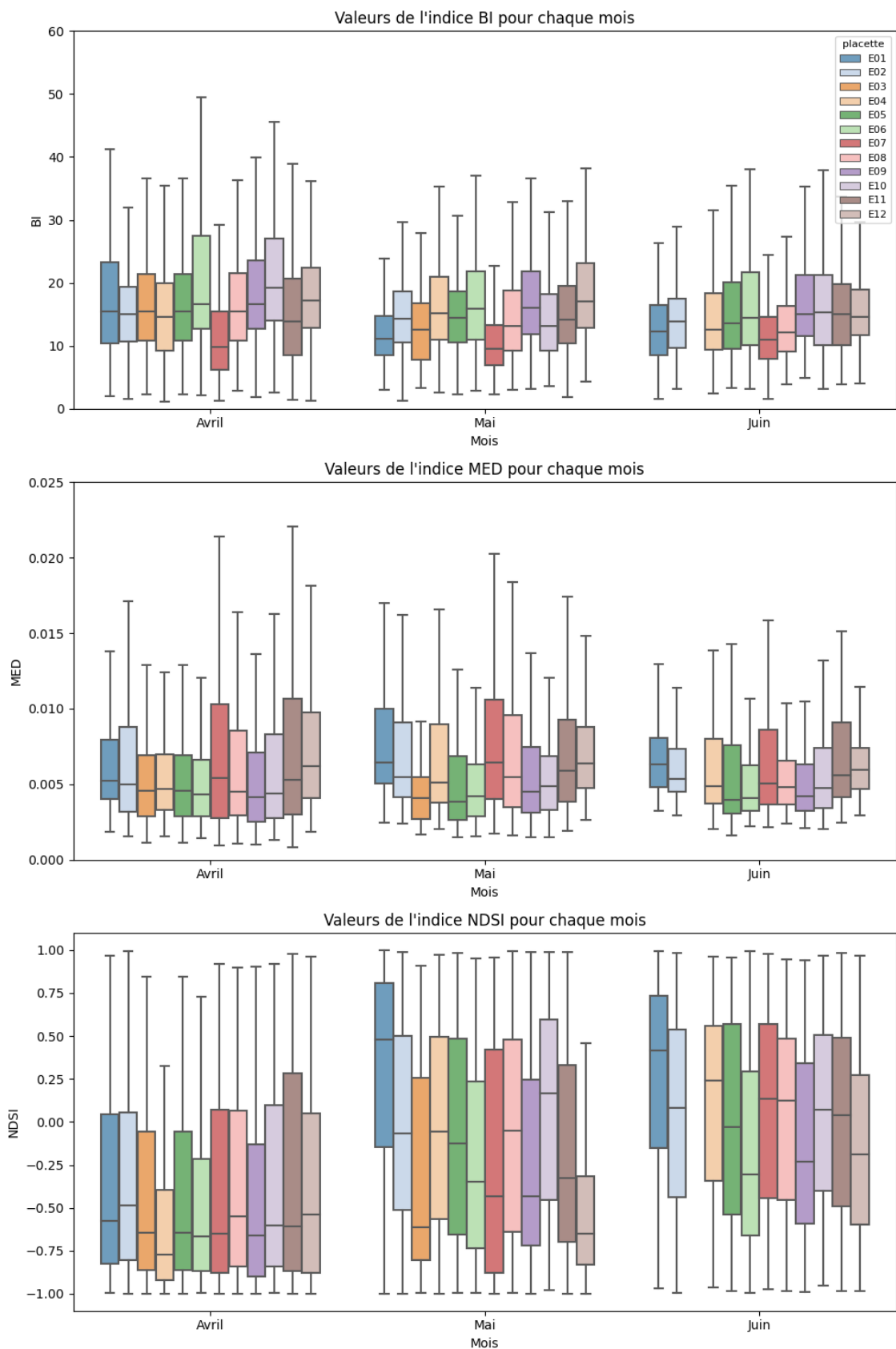


Figure 8. Distribution des valeurs calculées d'indices BI, MED et NDSI par mois et par placette. Cette représentation en boxplot ou boîtes à moustaches, permet de visualiser la médiane (trait horizontal), les 1^{er} et 3^{ème} quartiles contenant respectivement 25 et 75 % des valeurs (bas et haut des boîtes, intervalle aussi appelé IQR ou intervalle inter-quartile) ainsi qu'une plage correspondant à 1.5 fois l'IQR (les moustaches). Les valeurs extérieures aux moustache (outliers ou valeurs atypiques) n'ont pas été représentées de manière à rendre la figure plus lisible.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
 Suaello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'acquérir une base de données importante d'enregistrements dans le périmètre de la RNNHCJ. Ces données ont été analysées selon 4 objectifs :

- inventorer les espèces d'oiseaux nicheurs détectées,
- détecter les vocalisations de Grands Tétras,
- détecter les vocalisations de Loups gris,
- analyser les paysages sonores à l'aide d'une approche écoacoustique.

La base de données constituée au cours de cette étude représente également une solide référence dans le cadre de suivis à plus long terme. Un résultat important de cette étude réside dans la possibilité d'identifier un grand nombre de sources composant les paysages sonores de la RNNHCJ, et ce, malgré un niveau d'anthropophonie élevé dû principalement aux avions survolant la réserve et la proximité de routes. Cette étude a permis de mettre en évidence la pertinence du suivi par acoustique passive pour fournir des données importantes pour la gestion de la RNNHCJ.

Principaux résultats

L'approche mise en œuvre de suivi par acoustique passive a permis de fournir des informations de présence pour 65 espèces d'oiseaux nicheurs sur 12 placettes de la RNNHCJ. À l'échelle de chacune des placettes, le nombre d'espèces d'oiseaux nicheurs identifiées varie de 34 espèces pour la placette E03 (dont les enregistrements sont incomplets) à 46 espèces (placette E07). La présence des espèces considérées comme prioritaires dans cette étude (Aigle Royal, Chevêchette d'Europe, Faucon pèlerin, Gelinotte des bois, Grand Tétras, Nyctale de Tengmalm, Venturon montagnard) a été validée sur la RNNHCJ, le pic tridactyle, autre espèce prioritaire semble également avoir été identifié, avec un niveau de confiance toutefois plus faible. Le nombre d'espèces considérées comme prioritaires varie, lui, de 6 espèces détectées (placette E01) à 0 (placette E12).

Cette étude a également permis de détecter deux espèces d'intérêt : le Grand Tétras et le Loup gris, et d'éprouver plusieurs outils destinés à l'identification de ces espèces.

Des vocalisations de femelles de Grand Tétras ont été détectées sur les sites E01, E05 et E06. Les dates de détection s'étendent du 27/04 au 22/05 et les horaires de détection de 5h39 à 7h03 le matin. Le 22/05 les vocalisations ont été détectées à 20h55. Des vocalisations de Grand Tétras mâle ont uniquement été détectées sur la placette E05 le 30/04/2023 à 6h.

Des vocalisations de Loup gris ont été détectées sur les placettes E07, E09 et E10, le 8 avril et le 15 juin. Les horaires de détection s'étendent de 20h à 4h le matin. La vocalisation identifiée le 4 avril 2023 sur la placette E10 a également été enregistrée sur la placette E09. La détection de la présence du Loup est ainsi possible en déployant un protocole d'acoustique passive, y compris à une saison très défavorable à l'activité vocale de l'espèce.

Les paysages sonores de la RNNHCJ sont relativement homogènes entre les différentes placettes. Le ratio entre la biophonie et l'anthropophonie évolue entre avril (paysage dominé par l'anthropophonie) et juin (paysage dominé par la biophonie). Certaines placettes semblent plus impactées par les sons d'origine

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
Suaello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

anthropique : les placettes E06, E07, E09 et E12 sans qu'il n'y ait de corrélation avec le nombre d'espèces identifiées (42 et 46 espèces pour les placettes E06 et E07, et 36 et 37 sur les placettes E09 et E12).

L'indicateur BI semble corrélé à la richesse spécifique d'oiseaux dans le cadre de cette étude, ce qui permet d'identifier des sites d'intérêt particulier (un plus grand nombre d'espèces -43- sont présentes sur E01 avec un indice BI élevé à partir du mois de mai, en comparaison, par exemple, à la placette E12).

Retours d'expérience

Tous les enregistreurs sont restés en place le temps de l'étude, aucun vol ni dégradation volontaire des boîtiers n'a été déploré. Un défaut d'étanchéité a cependant détérioré un enregistreur après 1 mois d'enregistrement (placette E03). Des précautions supplémentaires sont à prévoir pour éviter ces problèmes matériels dans le futur : ajout d'une étape de vérification dans le protocole de déploiement, augmentation de l'étanchéité aux endroits critiques de l'enregistreur (adhésif étanche autour du joint de fermeture), utilisation de sachets absorbant l'humidité dans le boîtier de l'enregistreur.

Lors de l'analyse des enregistrements, des confusions entre la biophonie et la géophonie ou l'anthropophonie ont été observées. Différentes sources sonores peuvent réduire la performance des outils de détection et de classification automatiques. Certaines sources de perturbations ont été identifiées afin d'anticiper de nouvelles stratégies d'analyse (ex : les avions et les cloches du bétail, les bruits de pluie, etc.). Les bruits des gouttes de pluie sur les enregistrements ont diminué les capacités des algorithmes à identifier certaines espèces d'avifaune et notamment le Grand Tétrás. Pour réduire l'influence de la pluie, un matériau absorbant sera placé sur le dessus de l'enregistreur pour limiter le bruit causé par les chocs sur le boîtier. D'autres pistes à l'étape du post-traitement ont également été identifiées dans ce sens. Il semble également nécessaire d'utiliser des modèles sur-mesure prenant en compte les bruits ambiants pour la détection de certaines espèces dont le Grand Tétrás et le Loup gris.

Le choix du protocole spatio-temporel est à considérer avec précaution car il permet de renforcer la détectabilité d'une espèce d'intérêt. Ainsi, dans le cadre particulier du suivi par acoustique passive du Loup gris, un déploiement d'enregistreurs spécifiques, à la période optimale pour l'activité vocale du Loup gris est à envisager.

Perspectives

Le suivi de biodiversité par acoustique passive semble particulièrement pertinent pour répondre à des objectifs de description des peuplements d'avifaune dans un contexte de ZQFS, en limitant la présence humaine sur site. Afin d'affiner l'analyse des données récoltées sur les différentes placettes, il serait intéressant de pratiquer des mesures acoustiques de propagation, en dehors de la période de ZQFS.

Afin de compléter les données acquises par le suivi acoustique, il serait très intéressant de croiser les résultats obtenus avec ceux issus d'autres méthodes d'observation telles que le protocole STOM (adaptation du Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC) pour les oiseaux de montagne que la RNNHCJ souhaite initier) ou l'usage d'autres méthodes d'acquisition de données (données récoltées sur le terrain par l'équipe de la RNNHCJ, pièges photographiques, ADN environnemental par exemple).

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



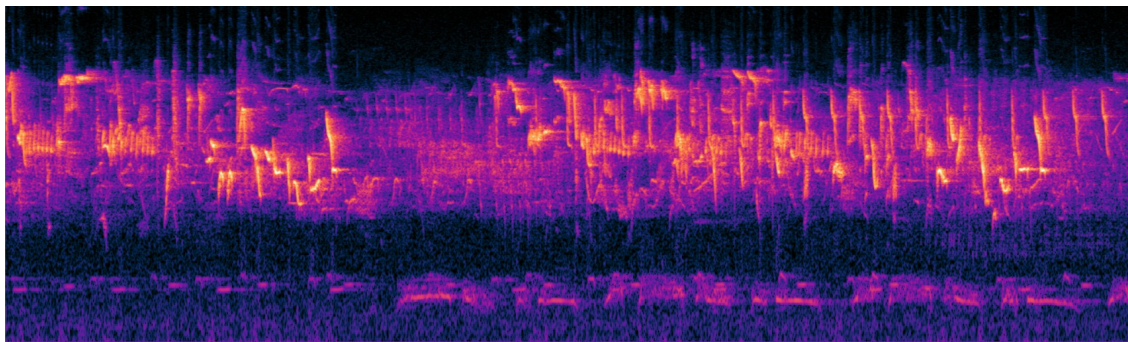
SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
Sualetto, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

L'inventaire des espèces d'oiseaux nicheurs a permis d'identifier la présence de 65 espèces dont 8 espèces prioritaires. Il serait intéressant de mener un inventaire comparable sur une année complète afin de décrire l'ensemble du cortège qui fréquente la RNNHCJ, y compris certaines espèces de passage. Certaines espèces identifiées dans cette étude sont connues pour leur rôle d'espèces bioindicatrices ou d'espèces parapluie. Une étude focalisée sur ces espèces semble également pertinente, pour donner des informations sur les mesures de gestion telles que la restauration d'habitat ou la mise en place de ZQFS.

Au regard du comportement vocal du Grand Tétras et des particularités de la population dans la RNNHCJ, il serait intéressant d'ajouter des données comportementales aux données acoustiques dans la méthode d'analyse automatique afin d'en augmenter les performances (*e.g.* utiliser le fait que sur une place de chant, les vocalisations d'une femelle ont tendance à solliciter une activité vocale plus intense de la part des mâles). En déployant un réseau d'enregistreurs plus dense dans une zone particulièrement propice à la détection des vocalisations de Grands Tétras (proche de places de chants connues actives), il serait possible de mieux décrire la population qui fréquente la RNNHCJ. Cela permettrait d'accéder à un plus grand nombre de détections et donc d'améliorer les performances des outils automatiques mais également de tenter de localiser de nouvelles places de chant et d'approfondir la connaissance du comportement de l'espèce.

Plusieurs vocalisations de Loups gris ont été enregistrées malgré le fait que la saison n'était pas favorable à l'activité vocale de l'espèce et que le protocole d'enregistrement n'ait pas été conçu spécifiquement pour détecter leur présence. Déployer de nouveau des enregistreurs acoustiques dans un objectif de suivi de la population de loups permettrait d'acquérir plus d'enregistrements de l'espèce et d'améliorer l'efficacité des outils de détection automatique (en faisant attention aux potentielles imitations humaines destinées à provoquer des hurlements). Également, il semble pertinent d'utiliser un réseau d'enregistreurs permettant la localisation de sources sonores dans l'espace. Cette approche permettrait d'accéder à des informations pertinentes pour les mesures de gestion, à savoir une estimation d'abondance ou la localisation d'endroits stratégiques pour l'espèce.

L'analyse des paysages sonores par les indices écoacoustiques semble être une approche particulièrement intéressante au sein de la RNNHCJ. Les évolutions temporelles des indices sélectionnés (NDSI, BI, MED) mettent en évidence une certaine homogénéité sur l'ensemble de la réserve mais également des particularités pour certains sites. Suivre l'évolution de ces indices sur le temps long permettrait de suivre l'évolution du paysage sonore en fonction de différents paramètres (météorologiques, climatiques, impact des mesures de gestion). Plusieurs indices ont évolué au cours de la saison d'enregistrement, identifier les périodes clefs de ces évolutions permettrait de décrire encore plus finement l'environnement sonore en liant ces résultats à différentes données écologiques.



Spectrogramme issu de l'enregistrement d'un chorus matinal, le 23 mai 2023 à 5h30, placette E01.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen-Ankins, S., McKnight, D. T., Nordberg, E. J., Hoefer, S., Roe, P., Watson, D. M., ... & Schwarzkopf, L. (2023). Effectiveness of acoustic indices as indicators of vertebrate biodiversity. *Ecological Indicators*, *147*, 109937.
- Alcocer, I., Lima, H., Sugai, L. S. M., & Llusia, D. (2022). Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis. *Biological Reviews*, *97*(6), 2209-2236.
- BioPhonia, Note technique : recherche de vocalisations de loups (*Canis lupus*), pour la RNNHCJ, Décembre 2023.
- Boelman, N. T., Asner, G. P., Hart, P. J., & Martin, R. E. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, *17*(8), 2137-2144.
- Bradfer-Lawrence, T., Gardner, N., Bunnefeld, L., Bunnefeld, N., Willis, S. G., & Dent, D. H. (2019). Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution*, *10*(10), 1796-1807.
- Carey, M. J. (2009). The effects of investigator disturbance on procellariiform seabirds: a review. *New Zealand Journal of Zoology*, *36*(3), 367-377.
- Gaspar, L. P., DA Scarpelli, M., Oliveira, E. G., Alves, R. S. C., Gomes, A. M., Wolf, R., ... & Ribeiro, M. C. (2023). Predicting bird diversity through acoustic indices within the Atlantic Forest biodiversity hotspot. *Frontiers in Remote Sensing*, *4*, 1283719.
- Ghani, B., Denton, T., Kahl, S., & Klinck, H. (2023). Feature embeddings from large-scale acoustic bird classifiers enable few-shot transfer learning. *arXiv preprint arXiv:2307.06292*.
- Hauptert, S., Sèbe, F., & Sueur, J. (2023). Physics-based model to predict the acoustic detection distance of terrestrial autonomous recording units over the diel cycle and across seasons: Insights from an Alpine and a Neotropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, *14*(2), 614-630.
- Kahl, S., Wood, C. M., Eibl, M., & Klinck, H. (2021). BirdNET: A deep learning solution for avian diversity monitoring. *Ecological Informatics*, *61*, 101236.
- Kasten, E. P., Gage, S. H., Fox, J., & Joo, W. (2012). The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological informatics*, *12*, 50-67.
- Papin, M. Apport de la bioacoustique pour le suivi d'une espèce discrète : le Loup gris (*Canis lupus*). 2018. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine.
- Ross, S. R. J., Friedman, N. R., Yoshimura, M., Yoshida, T., Donohue, I., & Economo, E. P. (2021). Utility of acoustic indices for ecological monitoring in complex sonic environments. *Ecological Indicators*, *121*, 107114.
- Ross, S. R. J., O'Connell, D. P., Deichmann, J. L., Desjonquères, C., Gasc, A., Phillips, J. N., ... & Burivalova, Z. (2023). Passive acoustic monitoring provides a fresh perspective on fundamental ecological questions. *Functional Ecology*, *37*(4), 959-975.
- Sánchez-Giraldo, C., Bedoya, C. L., Morán-Vásquez, R. A., Isaza, C. V., & Daza, J. M. (2020). Ecoacoustics in the rain: understanding acoustic indices under the most common geophonic source in tropical rainforests. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, *6*(3), 248-261.
- Sethi, S. S., Ewers, R. M., Jones, N. S., Sleutel, J., Shabrani, A., Zulkifli, N., & Picinali, L. (2022). Soundscapes predict species occurrence in tropical forests. *Oikos*, *2022*(3), e08525.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
Sualetto, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

Sethi, S. S., Bick, A., Ewers, R. M., Klinck, H., Ramesh, V., Tuanmu, M. N., & Coomes, D. A. (2023). Limits to the accurate and generalizable use of soundscapes to monitor biodiversity. *Nature Ecology & Evolution*, 7(9), 1373-1378.

Sossover, D., Burrows, K., Kahl, S., & Wood, C. M. (2024). Using the BirdNET algorithm to identify wolves, coyotes, and potentially their interactions in a large audio dataset. *Mammal Research*, 69(1), 159-165.

Sueur, J., Farina, A., Gasc, A., Pieretti, N., & Pavoine, S. (2014). Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(4), 772-781.

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.



SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B
Suaello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

ANNEXE 1 : LISTE DES ESPÈCES D'OISEAUX NICHEURS CONSIDÉRÉES

Nom vernaculaire	Nom latin	Nom latin synonyme	Nicheur en RNN	Priorité de conservation	Date dernière observation	Détection acoustique
Accenteur alpin	<i>Prunella collaris</i>	<i>Prunella collaris</i>	•	3	2017	
Accenteur mouchet	<i>Prunella modularis</i>	<i>Prunella modularis</i>	•	3	2017	x
Aigle royal	<i>Aquila chrysaetos</i>	<i>Aquila chrysaetos</i>	•	1	2017	x
Alouette des champs	<i>Alauda arvensis</i>	<i>Alauda arvensis</i>	•	2	2017	
Autour des palombes	<i>Accipiter gentilis</i>	<i>Accipiter gentilis</i>	•	2	2017	x
Bec croisé des sapins	<i>Loxia curvirostra</i>	<i>Loxia curvirostra</i>	•	3	2018	x
Becasse des bois	<i>Scolopax rusticola</i>	<i>Scolopax rusticola</i>	•	2	2017	x
Bergeronnette des ruisseaux	<i>Motacilla cinerea</i>	<i>Motacilla cinerea</i>	•	3	2004	
Bergeronnette grise	<i>Motacilla alba alba</i>	<i>Motacilla alba</i>	•	3	2017	
Bondrée apivore	<i>Pernis apivorus</i>	<i>Pernis apivorus</i>	•	2	2017	x
Bouvreuil pivoine	<i>Pyrrhula pyrrhula</i>	<i>Pyrrhula pyrrhula</i>	•	3	2018	x
Bruant des neiges	<i>Plectrophenax nivalis</i>	<i>Plectrophenax nivalis</i>	?	3	2004	
Bruant fou	<i>Emberiza cia</i>	<i>Emberiza cia</i>	•	3	2018	x
Bruant proyer	<i>Emberiza calandra</i>	<i>Emberiza calandra</i>	?	3	1996	
Buse variable	<i>Buteo buteo</i>	<i>Buteo buteo</i>	•	3	2017	x
Canard colvert	<i>Anas platyrhynchos</i>	<i>Anas platyrhynchos</i>	•	3	2003	
Cassenoix mouchete	<i>Nucifraga caryocatactes</i>	<i>Nucifraga caryocatactes</i>	•	3	2017	x
Chardonneret elegant	<i>Carduelis carduelis</i>	<i>Carduelis carduelis</i>	•	3	2017	x
Chevechette d'Europe	<i>Glaucidium passerinum</i>	<i>Glaucidium passerinum</i>	•	1	2015	x
Chouette cheveche	<i>Athene noctua</i>	<i>Athene noctua</i>		3	Historique	

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Suaello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

Nom vernaculaire	Nom latin	Nom latin synonyme	Nicheur en RNN	Priorité de conservation	Date dernière observation	Détection acoustique
Chouette effraie	<i>Tyto alba</i>	<i>Tyto alba</i>		3	Historique	
Chouette hulotte	<i>Strix aluco</i>	<i>Strix aluco</i>	•	3	2017	x
Cinle plongeur	<i>Cinclus cinclus</i>	<i>Cinclus cinclus</i>	•	3	1996	
Corneille noire	<i>Corvus corone</i>	<i>Corvus corone</i>	•	3	2018	x
Coucou gris	<i>Cuculus canorus</i>	<i>Cuculus canorus</i>	•	3	2017	x
Epervier d'Europe	<i>Accipiter nisus</i>	<i>Accipiter nisus</i>	•	3	2017	x
Etourneau sansonnet	<i>Sturnus vulgaris</i>	<i>Sturnus vulgaris</i>	•	3	Historique	
Faucon crecerelle	<i>Falco tinnunculus</i>	<i>Falco tinnunculus</i>	•	2	2017	
Faucon hobereau	<i>Falco subbuteo</i>	<i>Falco subbuteo</i>	•	3	2008	x
Faucon pèlerin	<i>Falco peregrinus</i>	<i>Falco peregrinus</i>	•	1	2018	x
Fauvette à tête noire	<i>Sylvia atricapilla</i>	<i>Sylvia atricapilla</i>	•	3	2017	x
Fauvette des jardins	<i>Sylvia borin</i>	<i>Sylvia borin</i>	•	3	2017	
Fauvette grisette	<i>Sylvia communis</i>	<i>Curruca communis</i>	•	3	1996	
Geai des chenes	<i>Garrulus glandarius</i>	<i>Garrulus glandarius</i>	•	3	2017	x
Gelinotte des bois	<i>Bonasa bonasia</i>	<i>Tetrastes bonasia</i>	•	1	2017	x
Gobemouche gris	<i>Muscicapa striata</i>	<i>Muscicapa striata</i>	•	3	2017	x
Grand corbeau	<i>Corvus corax</i>	<i>Corvus corax</i>	•	2	2018	x
Grand Tetras	<i>Tetrao urogallus major</i>	<i>Tetrao urogallus</i>	•	1	2018	x
Grand-duc d'Europe	<i>Bubo bubo</i>	<i>Bubo bubo</i>		2	2016	
Grimpereau des bois	<i>Certhia familiaris</i>	<i>Certhia familiaris</i>	•	3	2017	x
Grimpereau des jardins	<i>Certhia brachydactyla</i>	<i>Certhia brachydactyla</i>	•	3	2017	x
Grive draine	<i>Turdus viscivorus</i>	<i>Turdus viscivorus</i>	•	3	2017	x
Grive musicienne	<i>Turdus philomelos</i>	<i>Turdus philomelos</i>	•	3	2017	x
Grosbec casse-noyaux	<i>Coccothraustes coccothraustes</i>	<i>Coccothraustes coccothraustes</i>	•	3	2017	x

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Suaello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

Nom vernaculaire	Nom latin	Nom latin synonyme	Nicheur en RNN	Priorité de conservation	Date dernière observation	Détection acoustique
Hibou moyen-duc	<i>Asio otus</i>	<i>Asio otus</i>	•	3	2017	x
Hirondelle de rochers	<i>Ptyonoprogne rupestris</i>	<i>Ptyonoprogne rupestris</i>	•	3	2003	x
Linotte mélodieuse	<i>Carduelis cannabina</i>	<i>Linaria cannabina</i>	•	3	2017	x
Martinet à ventre blanc	<i>Tachymarptis melba</i>	<i>Apus melba</i>	•	3	2002	
Merle à plastron	<i>Turdus torquatus</i>	<i>Turdus torquatus</i>	•	2	2017	x
Merle noir	<i>Turdus merula</i>	<i>Turdus merula</i>	•	3	2017	x
Mesange à longue queue	<i>Aegithalos caudatus</i>	<i>Aegithalos caudatus</i>	•	3	2017	x
Mesange bleue	<i>Cyanistes caeruleus</i>	<i>Cyanistes caeruleus</i>	•	3	2017	x
Mesange boreale	<i>Parus montanus</i>	<i>Poecile montanus</i>	•	3	2017	x
Mesange charbonnière	<i>Parus major</i>	<i>Parus major</i>	•	3	2017	x
Mesange huppee	<i>Lophophanes cristatus</i>	<i>Lophophanes cristatus</i>	•	3	2017	x
Mesange noire	<i>Periparus ater</i>	<i>Periparus ater</i>	•	3	2016	x
Mesange nonnette	<i>Poecile palustris</i>	<i>Poecile palustris</i>	•	3	2017	x
Monticole de roche	<i>Monticola saxatilis</i>	<i>Monticola saxatilis</i>	•	2	2017	
Nyctale de Tengmalm	<i>Aegolius funereus</i>	<i>Aegolius funereus</i>	•	1	2017	x
Pic épeiche	<i>Dendrocopos major</i>	<i>Dendrocopos major</i>	•	3	2017	x
Pic mar	<i>Dendrocopos medius</i>	<i>Dendrocoptes medius</i>	•	3	Historique	x
Pic noir	<i>Dryocopus martius</i>	<i>Dryocopus martius</i>	•	3	2017	x
Pic tridactyle	<i>Picoides tridactylus</i>	<i>Picoides tridactylus</i>	•	1	2016	x
Pic vert	<i>Picus viridis</i>	<i>Picus viridis</i>	•	3	2017	x
Pie-grièche écorcheur	<i>Lanius collurio</i>	<i>Lanius collurio</i>	•	2	2017	
Pigeon colombin	<i>Columba oenas</i>	<i>Columba oenas</i>	•	3	2017	
Pigeon ramier	<i>Columba palumbus</i>	<i>Columba palumbus</i>	•	3	2017	x
Pinson des arbres	<i>Fringilla coelebs</i>	<i>Fringilla coelebs</i>	•	3	2017	x
Pipit des arbres	<i>Anthus trivialis</i>	<i>Anthus trivialis</i>	•	3	2017	x

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Sualello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr

Nom vernaculaire	Nom latin	Nom latin synonyme	Nicheur en RNN	Priorité de conservation	Date dernière observation	Détection acoustique
Pipit farlouse	<i>Anthus pratensis</i>	<i>Anthus pratensis</i>	•	3	2017	x
Pipit spioncelle	<i>Anthus spinoletta</i>	<i>Anthus spinoletta</i>	•	3	2017	x
Pouillot de Bonelli	<i>Phylloscopus bonelli</i>	<i>Phylloscopus bonelli</i>	•	3	2017	x
Pouillot fitis	<i>Phylloscopus trochilus</i>	<i>Phylloscopus trochilus</i>	•	3	1996	x
Pouillot siffleur	<i>Phylloscopus sibilatrix</i>	<i>Phylloscopus sibilatrix</i>	•	3	2003	x
Pouillot veloce	<i>Phylloscopus collybita</i>	<i>Phylloscopus collybita</i>	•	3	2017	x
Roitelet à triple-bandeau	<i>Regulus ignicapilla</i>	<i>Regulus ignicapilla</i>	•	3	2017	x
Roitelet huppe	<i>Regulus regulus</i>	<i>Regulus regulus</i>	•	3	2017	x
Rougegorge familier	<i>Erithacus rubecula</i>	<i>Erithacus rubecula</i>	•	3	2017	x
Rougequeue à front blanc	<i>Phoenicurus phoenicurus</i>	<i>Phoenicurus phoenicurus</i>	•	3	2017	
Rougequeue noir	<i>Phoenicurus ochruros</i>	<i>Phoenicurus ochruros</i>	•	3	2017	
Serin cini	<i>Serinus serinus</i>	<i>Serinus serinus</i>	•	3	Historique	x
Sittelle torchepot	<i>Sitta europaea</i>	<i>Sitta europaea</i>	•	3	2017	x
Sizerin flamme	<i>Acanthis flammea</i>	<i>Acanthis flammea</i>	•	3	2017	
Tarier pâtre	<i>Saxicola rubicola</i>	<i>Saxicola rubicola</i>	•	3	1996	
Tarin des aulnes	<i>Carduelis spinus</i>	<i>Spinus spinus</i>	•	3	2018	x
Tichodrome echelette	<i>Tichodroma muraria</i>	<i>Tichodroma muraria</i>	•	2	2017	
Torcol fourmilier	<i>Jynx torquilla</i>	<i>Jynx torquilla</i>	•	3	1998	
Traquet motteux	<i>Oenanthe oenanthe</i>	<i>Oenanthe oenanthe</i>	•	3	2017	
Troglodyte mignon	<i>Troglodytes troglodytes</i>	<i>Troglodytes troglodytes</i>	•	3	2017	x
Venturon montagnard	<i>Carduelis citrinella</i>	<i>Carduelis citrinella</i>	•	1	2017	x
Verdier d'Europe	<i>Carduelis chloris</i>	<i>Chloris chloris</i>	•	3	2017	x

Ce document est confidentiel dans le cadre du projet de collaboration entre BioPhonia et la RNN Haute Chaîne du Jura.

SAS BioPhonia au capital de 7500 EUR | SIRET n° 89204103900017 – APE 7112B

Sualello, 20232 Oletta, contact@biophonia.fr