

**Convention de Collaboration BIODIVCONNECT
ASTER - Université Jean Monnet de Saint-Etienne -Biophonia**

ETUDE BIOACOUSTIQUE ET CONNECTIVITE ECOLOGIQUE

**Rapport final
Décembre 2022**

Sommaire

1	Avant-propos.....	3
1.1	Données administratives.....	3
1.2	Acteurs principaux du projet.....	4
1.3	Publications et documents de travail réalisés.....	5
2	Position du problème et objectifs.....	6
3	Introduction et état de l'art.....	7
4	Matériel et Méthode.....	8
4.1	Localisation.....	8
4.2	Matériel d'enregistrement.....	8
4.3	Période d'enregistrement.....	8
4.4	Données exploitable.....	9
4.5	Analyses acoustiques.....	10
4.5.1	Analyses par réseaux de neurone et UMAP.....	10
4.5.2	Analyses par indices.....	12
5	Résultats.....	15
5.1	Principaux résultats sur les réseaux de neurone et UMAP.....	15
5.1.1	Similarité et évolution temporelle des caractéristiques du paysage sonore par UMAP :15	
5.1.2	Volumes et recouvrements.....	17
5.2	Principaux résultats sur les indices.....	18
5.2.1	Analyse par enregistreur – Détection des cas particuliers.....	19
5.2.2	Corrélation entre indices acoustiques.....	20
5.2.3	Analyse spatiale.....	21
5.2.4	Analyse par habitat.....	23
5.2.5	Analyse temporelle.....	26
5.2.6	Analyse de la connectivité structurelle acoustique.....	34
5.3	Bilan Global.....	37
5.3.1	Objectifs atteints.....	37
5.3.2	Limites et perspectives.....	38
6	Perspectives et projet futur.....	39
6.1	Prochaines actions.....	39
6.2	Contribution aux programmes nationaux et à la trame blanche.....	39
7	Bibliographie.....	40

1 Avant-propos

1.1 Données administratives

Intitulé : BIODIV'CONNECT – Protéger les espèces et les écosystèmes au travers de connectivités écologiques transalpines dynamiques et innovantes.

Thème de recherche : mise au point de méthodes de suivis des corridors écologique

Organismes impliqués :

Asters

Conservatoire d'espaces naturels de Haute-Savoie

Association Loi 1901,

N° SIRET 326 356 177 00 120

Dont le siège est 84 route du Viéran, P.A.E. de Pré-Mairy, 74370 PRINGY

Représentée par son Président, Monsieur Thierry LEJEUNE

BioPhonia

Société par Actions Simplifiée (SAS) au capital de 7500€ immatriculée au RCS de BASTIA, N° Siren : 892041093,

Dont le siège social est situé à Sualello, 20232 OLETTA,

Représentée par Juliette LINOSSIER, en qualité de Présidente et Léo Papet et Clément Cornec, en qualité de Directeurs Généraux.

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 associés 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.

Université Jean Monnet Saint-Etienne

Etablissement Public à caractère Scientifique Culturel et Professionnel,

N° SIRET 194 210 951 00423,

Située au 10, rue Tréfilerie – CS82301, 42023 Saint-Etienne cedex 2,

Représentée par son Président, Monsieur Florent PIGEON,

Agissant aux côtés du CNRS, de l'INSERM et de l'Université Claude Bernard Lyon 1, établissements conjointement désignés par les Etablissements, dans le cadre des activités de l'équipe de Neuro-Ethologie Sensorielle, équipe de recherche rattachée depuis le 1^{er} janvier 2021 à l'Unité Mixte de Recherche 5292, ci-après désignée par ENES, situé au 23 rue Paul Michelon – 42023 Saint-Etienne Cedex 2, et dirigée par Monsieur Nicolas Mathevon. Par la convention quinquennale de site signée le 26 juin 2018, l'UJM a reçu mandat pour signer certains contrats au nom et pour le compte des Etablissements, dont le présent contrat.

Responsable scientifique UJM : Frédéric SEBE

Responsables scientifiques ASTER : Carole BIRCK

Responsables scientifiques Biophonia Juliette LINOSSIER, en qualité de Présidente et Léo Papet et Clément Cornec, en qualité de Directeurs Généraux

Durée de la convention : 10mois

Montant total de la contribution ASTER pour l'ENES : 10 000 €

Montant total de la contribution ASTER pour Biophonai : 15 000 €

Liminaire :

Le Projet Intégré Thématique (PITEM) BIODIVALP – “Protéger et valoriser la biodiversité et les écosystèmes alpins par un partenariat et un réseau de connectivité écologique transfrontalier” implique un grand nombre de partenaires sur le territoire franco-italien et couvre 5 régions franco-italiennes : PACA, AuRa, Piémont, Ligurie et Val d'Aoste. Il est cofinancé dans le cadre du programme franco-italien Alcotra.

Il se décline en 5 projets opérationnels dont le projet simple 4 "**BIODIV'CONNECT – Protéger les espèces et les écosystèmes au travers de connectivités écologiques transalpines dynamiques et innovantes**" piloté par la Région AURA. Il a pour objet de créer un socle commun sur la connectivité écologique transalpine.

Dans une approche transfrontalière, il s'agit de :

- Capitaliser les connaissances et les expériences, dresser un diagnostic et faire émerger des enjeux communs
- Comparer des méthodes, des politiques et des actions pour préfigurer une stratégie de connectivités écologiques transfrontalières
- Elaborer une stratégie commune de connectivités écologiques
- Agir à l'échelle régionale pour préserver et restaurer les continuités écologiques
- Agir à l'échelle locale pour préserver et restaurer les continuités écologiques.

Asters, CEN74 est partenaire du projet BIODIV'CONNECT. Le conservatoire est en charge de la mise en œuvre d'une action du **Work package 4 : Agir pour préserver et restaurer les continuités écologiques dont l'objectif est d'améliorer la connaissance des connectivités écologiques.**

L'activité de l'ENES est centrée sur la bioacoustique, la science des signaux sonores animaux et humains. Ancrée dans l'éthologie (étude des comportements), l'ENES a une longue tradition en neurosciences (mécanismes des communications acoustiques) et en écologie (impact des environnements abiotiques et biotiques sur l'évolution des communications ; outils bioacoustiques pour l'évaluation de la biodiversité).

1.2 Acteurs principaux du projet

C. Birck, chargée de mission ASTER

I. Champly, chargée de mission ASTER

M. Guitteny, Chargée de projet ASTER

J. Linossier, Présidente Directeurs Généraux. ASTER

L. Papet, Directeurs Généraux ASTER

M. Bru, Ingénieur ASTER

F. Sèbe, enseignant chercheur UJM ENES

Q. Hammard, Master 2 MOBI UJM 2021

B. Alfathi, Master 1 UJM 2021

R Emonet enseignant chercheur UJM LHC

1.3 Publications et documents de travail réalisés

Rapports et comptes rendus :

4-Rapport de Biophonia : (2022) Rapport de la prestation d'analyse de données en bioacoustique M. Bru, J. Linossier, L. Papet, C. Cornec et M. Ducrettet

3-Rapport de M1 UJM : (2022) Eco-acoustic and Ecosystem Connectivity in Corridors . B. Alfathi encadrée par F. Sèbe et R. Emonet

2-Rapport de M2 MOBI UJM : (2021) Eco-acoustic and Ecosystem Connectivity in Ecological Corridors Q Hamard, encadrée par M. T. Marin-Cudraz et F. Sèbe

1-C.R. ASTER 2021 : Projet Bio'nCo Essai de définition de la fonctionnalité bioacoustique de corridors écologiques. C. Birck, I. Champly, M. Guitteny et F. Sèbe.

Présentations et congrès:

1- F. Sèbe, C. Brick, I. Champly, M. B. Alfathi, Q. Hamard, R. Emonet, N. Mathevon Use of AI to access acoustic connectivity in corridors. Congrès imaginology2 : machine learning pour le traitement et l'analyse d'images et de sons en écologie 29-30 sept. 2022 Villeurbanne (France)

2 Position du problème et objectifs

Une cause importante de perte de biodiversité est la fragmentation de l'habitat, qui survient lorsque les activités humaines modifient le paysage en diminuant la taille des espaces de milieu naturel et en créant des barrières à la circulation des espèces entre ces espaces. Ainsi, dans les dernières décennies, une des principales politiques d'aménagement du territoire pour enrayer la perte de biodiversité est de renforcer la préservation et la restauration des continuités écologiques entre les milieux naturels. Bien que cette restauration et la mise en place de corridors est devenue un enjeu fort pour la conservation de la biodiversité, très peu d'études ont étudié l'impact des contraintes anthropiques sur la fonctionnalité de ces corridors écologiques. C'est par le prisme du son que notre projet souhaite se saisir de cet enjeu. En effet, le développement récent de systèmes d'enregistrements audio permet d'analyser des paysages sonores sur de longues périodes, et d'inventorier les signaux acoustiques émis par les espèces animales, afin d'évaluer la biodiversité d'un site. Couplée à une analyse de l'anthropisation du paysage acoustique, l'écoacoustique permet également d'évaluer l'impact des pollutions sonores sur la biodiversité.

Nous menons actuellement un projet de suivi de la connectivité acoustique de deux corridors avec le conservatoire d'espace naturel de Haute Savoie. La participation au programme Synergie nous permettra de finaliser la mise en évidence des liens entre pressions humaines et impacts sur la biodiversité au sein des corridors écologiques, mais surtout de proposer de nouveaux indicateurs et de nouveaux protocoles pour analyser l'impact des barrières anthropiques sur la fonctionnalité des corridors écologiques.

Objectif général : Mise en place d'indicateurs acoustiques d'analyse de la connectivité écologique dans les corridors.

Avec deux parties :

- Analyse de la connectivité du paysage sonore par des méthodes de Deep Learning et UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) réalisée par l'ENES,
- Analyse de la connectivité du paysage sonore par l'analyse des indices de biodiversité acoustique réalisée par BioPhonia.

3 Introduction et état de l'art

Dans les dernières décennies, une des principales politiques d'aménagement du territoire pour enrayer la perte de biodiversité a été de renforcer la préservation et la restauration des continuités écologiques entre les milieux naturels (Beier et Noss, 1998 ; Bennett, 2003). En effet, La perte d'habitats et leur fragmentation due à l'urbanisation, ont été identifiées comme des causes primaires de l'érosion de la biodiversité (Pimm et al., 1995 ; Breckheimer et al., 2014 ; Bates et al., 2014). Ainsi, les activités humaines modifient le paysage en créant des barrières à la circulation des espèces et en diminuant la taille des espaces de milieu naturel (McKinney 2002). Cette réduction de la taille des fragments d'habitats et l'augmentation de leur isolement réduit, à long terme, la viabilité des populations d'espèces qui y vivent (Opdam et al., 1993).

Bien que la restauration et la mise en place de corridors soit devenue un enjeu fort pour la conservation de la biodiversité (Berges 2010), très peu d'études ont étudié l'impact des contraintes anthropiques sur la fonctionnalité de ces corridors écologiques et nous ne disposons que de peu d'outils d'analyse de cette connectivité (Pierik et al.2016).

C'est par le prisme du son que notre projet souhaite se saisir de cet enjeu et contribuer au suivi et à la préservation de la biodiversité dans les corridors écologiques. En effet, l'analyse et l'utilisation des signaux acoustiques peuvent rendre de nombreux services dans la détermination des espèces et l'identification des individus, l'étude des dynamiques de population et la gestion et la conservation de nombreuses espèces gibiers et/ou d'intérêt patrimonial (Sèbe, 2012). A une plus large échelle d'étude, passant de l'individu à la population, la communauté ou le paysage, l'enregistrement des paysages sonores sur de grands espaces et de longues périodes permet de traiter des questions fondamentales en écologie. La prise en compte des sons environnementaux au niveau d'un écosystème ou d'un environnement pour des investigations écologiques ouvre un champ de recherche qui est défini par le terme d'écoacoustique (Sueur & Farina, 2015). Cette approche écosytémique consiste à développer et calculer des indices d'analyse du paysage sonore sans requérir à l'identification des espèces émettrices. Le suivi acoustique devient donc un proxy des milieux échantillonnés en s'intéressant non plus à l'individu ou à l'espèce mais cette fois à de plus grandes structures écologiques, comme la communauté acoustique, comprenant un ensemble de sons produits par un ensemble d'organismes coexistants dans un habitat donné pendant une durée déterminée (Gasc et al., 2013). Ainsi, il est généralement admis qu'une augmentation du nombre d'espèces dans la communauté animale induit une augmentation de la quantité et de la diversité des sons émis. Le résultat est une compression de l'information contenue dans le signal en une valeur unique faisant office d'indicateur de la diversité sonore de la communauté animale (i.e. indice d'entropie acoustique (Sueur et al., 2008), indice de complexité acoustique (Pieretti et al., 2011)). Plusieurs méthodes et indices ont ainsi permis d'analyser des paysages sonores sur de longues périodes, et d'inventorier les signaux acoustiques émis par les espèces animales, afin d'évaluer la biodiversité d'un site (Alcocer et al 2022). Couplée à une analyse de l'anthropisation du paysage acoustique, l'écoacoustique permet également d'évaluer l'impact des pollutions sonores sur la biodiversité (Waren et al 2006).

4 Matériel et Méthode

4.1 Localisation

En 2021, le choix s'est porté sur deux corridors inscrits dans le SRCE de la vallée Arve-Giffre, de tailles relativement identiques (cf. Rapport du 08/10/2021) où l'installation des capteurs et leurs désinstallations pouvaient être réalisés en une seule journée, à Chamonix (CH 1) et Praz sur Arly/Megève (PM). Les surfaces étudiées sont d'environ 200 hectares chacune. L'altitude est comprise entre 1100 m et 1400 m.

- Site d'étude 1 : Chamonix (désigné par « **CH** » dans la suite), 21 enregistreurs ont été déployés ;

- Site d'étude 2 : Praz-sur-Arly/Megève (désigné par « **PM** » dans la suite), 15 enregistreurs ont été déployés.

Ces deux sites d'étude sont des vallées de montagne, toutes deux traversées par une route et une rivière. Le site d'étude 1 inclut également une voie-ferrée dans la vallée.

Pour chaque vallée, les positions de déploiement des enregistreurs ont été définies selon une grille de résolution spatiale de 300 mètres couvrant les versants de la vallée, la zone plus anthropisée au centre et couvrant les différents types d'habitats de chaque vallée.

4.2 Matériel d'enregistrement

Les enregistreurs acoustiques autonomes utilisés sont des Audiomoths v1.1.0 (version de l'enregistreur, Open Acoustic Devices) dans leurs boîtiers IPX7 (Open Acoustic Devices). L'échantillonnage de fréquence choisi est de 48 kHz pour couvrir toutes les bandes de fréquences de la géophonie et de l'anthropophonie (0-2 kHz) et celles de la biophonie (2-10 kHz).

4.3 Période d'enregistrement

Les enregistreurs ont été déployés sur 4 périodes entre 2021 et 2022 :

- **P1** – printemps 2021 : du 25/03/2021 au 27/04/2021
 - Enregistrement 1 minute toutes les 10 minutes de 03h à 23h,
 - Fréquence d'échantillonnage : 48 kHz,
 - Gain : medium,
 - Noms des fichiers correspondant à l'heure UTC.
- **P2** – été 2021 : du 27/07/2021 au 26/08/2021,
 - Enregistrement 1 minute toutes les 10 minutes de 03h à 23h,
 - Fréquence d'échantillonnage : 48 kHz,
 - Gain : medium,
 - Noms des fichiers correspondant à l'heure UTC.
- **P3** – printemps 2022 : du 25/03/2022 au 30/05/2022,
 - Enregistrement 1 minute toutes les 10 minutes de 00h à 24h,
 - Fréquence d'échantillonnage : 48 kHz,
 - Gain : medium,
 - Noms des fichiers correspondant à l'heure UTC.
- **P4** – été 2022 : du 29/07/2022 au 25/08/2022,
 - Enregistrement 1 minute toutes les 10 minutes de 00h à 24h,
 - Fréquence d'échantillonnage : 192 kHz,
 - Gain : medium,
 - Noms des fichiers correspondant à l'heure UTC+2.

► Le passage à l'heure d'été (UTC+1 → UTC+2) ayant eu lieu le 28/03 en 2021 et le 27/03 en 2022, la majorité des enregistrements ont lieu durant cette période. C'est donc l'heure d'été (UTC+2) qui est retenue dans la suite comme référence.

► Des enregistreurs supplémentaires ont également été placés proches de la route pour les périodes P3 et P4. Les données issues de ces enregistreurs ne sont pas traitées dans le cadre de cette étude. Ces données sont conservées et pourront être exploitées dans de futures analyses, notamment pour estimer la fréquentation du trafic routier par des méthodes acoustiques (qualification de sources sonores : motos, voitures, camions, etc.).

► La période P4 n'est pas analysée dans ce rapport en raison d'une erreur de configuration (filtre passe-bande 6-18kHz) rendant les données difficilement interprétables et comparables aux autres périodes.

4.4 Données exploitable

La Figure 1 représente les dates retenues pour définir les périodes analysées dans ce rapport :

• P1 : du 25/03/2021 au 27/04/2021 ; • P2 : du 27/07/2021 au 26/08/2021 ; • P3 : du 25/03/2022 au 30/05/2022. Les enregistrements du printemps 2022 (P3) s'étalant sur une plus longue période que ceux du printemps 2021 (P1), ils ne sont pas directement comparables. Pour pouvoir les comparer, la période notée « **P3b** » dans la suite de ce rapport est définie du 25/03/2022 au 27/04/2022.

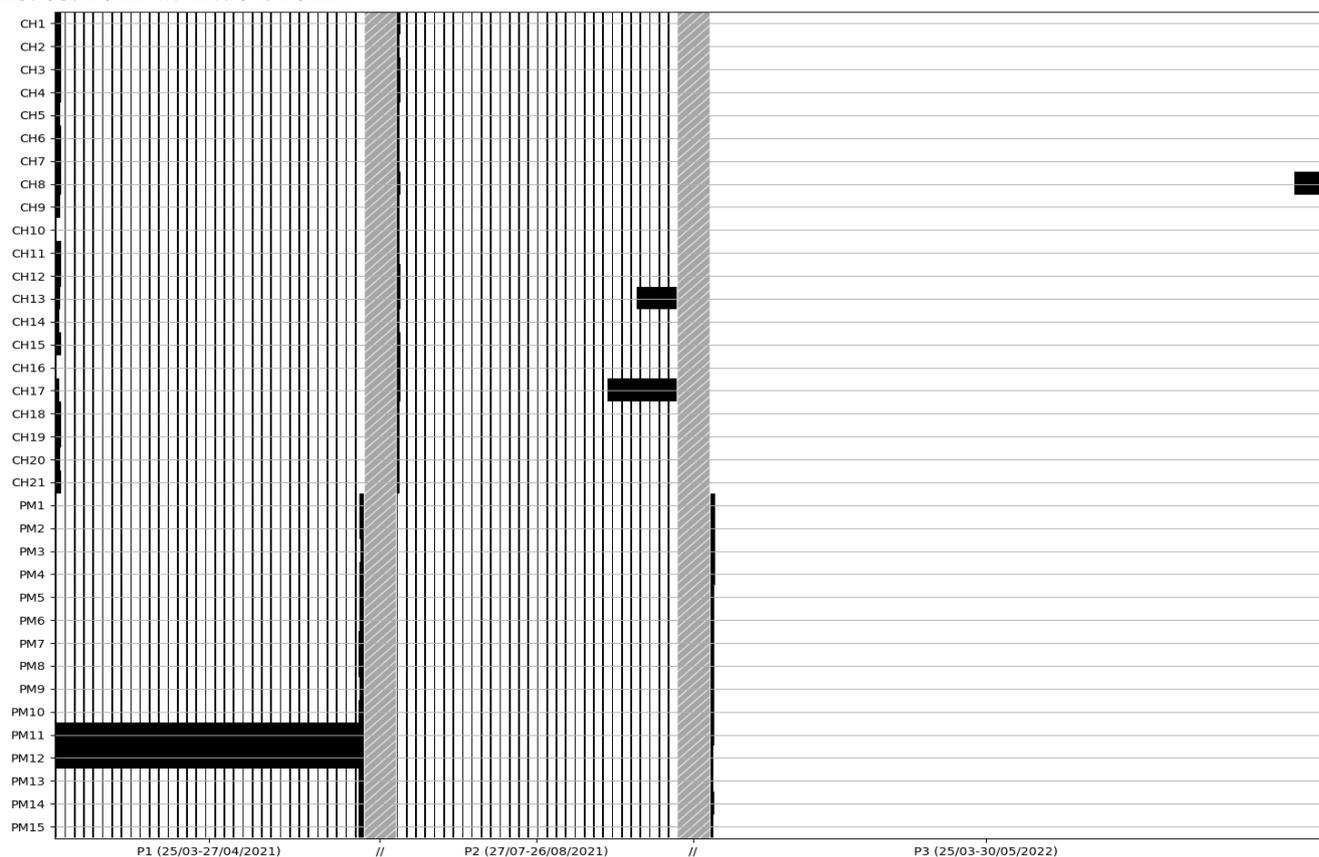


Figure 1 : Représentation des *périodes d'enregistrement disponibles et exploitables* pour les périodes **P1** (25/03-27/04/2021), **P2** (27/07-26/08/2021) et **P3** (25/03-30/05/2022). Chaque ligne correspond à un enregistreur déployé : **CH** pour le site d'étude de Chamonix et **PM** pour le site d'étude Praz-sur-Arly/Megève. Les enregistrements disponibles correspondent aux périodes colorées en blanc, les données manquantes correspondent aux périodes colorées en noir. Les zones hachurées marquent les limites des différentes périodes d'enregistrement P1, P2 et P3.

Les fines barres noires verticales régulièrement réparties dans les périodes P1 et P2 correspondent aux périodes nocturnes de 01h à 05h non-enregistrées. Les enregistreurs PM11 et PM12 n'ont pas fonctionné durant la période P1. Certains enregistreurs se sont également arrêtés avant leur date de retrait (CH13 et CH17 durant P2, CH8 durant P3). Les petits éléments noirs au début et à la fin des périodes correspondent au fait que le déploiement et le retrait des enregistreurs s'est étalé sur plusieurs heures.

4.5 Analyses acoustiques

4.5.1 Analyses par réseaux de neurone et UMAP

Les projets de suivi des paysages sonores et de la biodiversité acoustique génèrent une quantité importante de signaux sonores et utilisent de nouvelles méthodes calculatoires du traitement du signal et de Machine Learning. Dans cette partie de l'étude, la diversité acoustique globale du paysage a été quantifiée dans les différents corridors par une cartographie de la distribution spatiale et temporelle des caractéristiques acoustiques des enregistrements. La mise en œuvre de cette phase d'analyse du projet s'est faite au laboratoire de l'Equipe de Neuro-Ethologie Sensorielle, ENES/CRNL, Université de Saint-Étienne, qui développe de nouvelles méthodes de discrimination et de classification utilisant l'apprentissage profond de réseaux d'Intelligence Artificielle (CNN). Cette plateforme utilise de nouvelles méthodes de discrimination et de classification et permet donc d'analyser rapidement la composition des paysages sonores et d'avoir une représentation cartographique de la distribution spatiale et temporelle de la biodiversité sonore dans les corridors.

En se basant sur les travaux de SETHY (2020), les caractéristiques des fichiers audio sont extraites sur la base de CNN pré-entraînés en utilisant le jeu de données AudioSet de Google pour obtenir l'UMAP des points sur une période de temps spécifique. Chaque échantillon de 0,96 s de données éco-acoustiques est intégré dans un espace de caractéristiques à 128 dimensions ; la moyenne des caractéristiques acoustiques apprises est calculée sur 1 minute consécutive. Les CNN nous ont permis d'identifier des clusters parmi les différentes heures et les différents habitats.

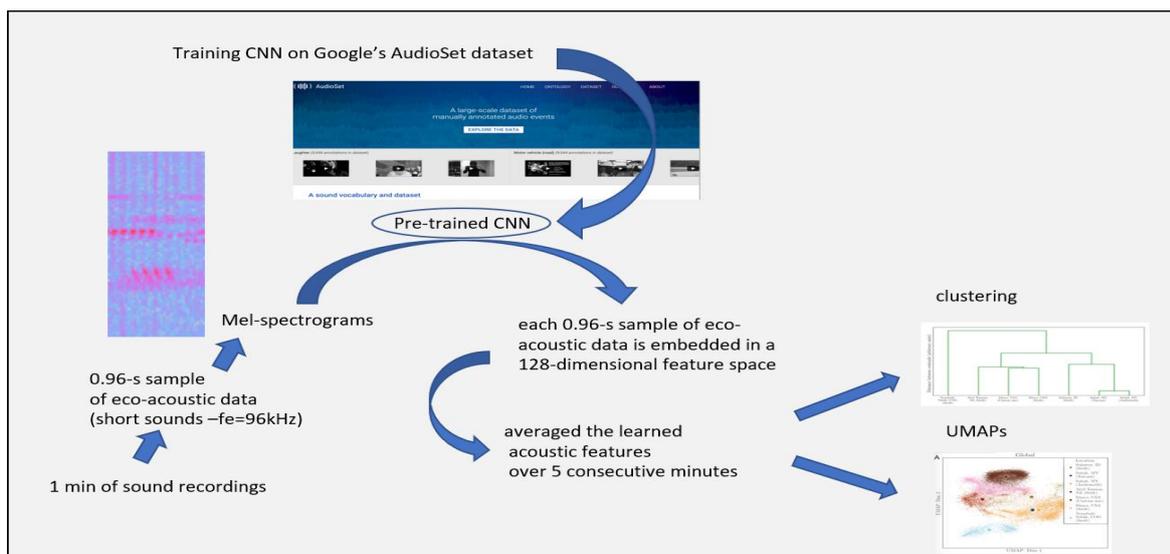


Fig. 2. Représentation du principe d'extraction des caractéristiques des signaux acoustiques analysés.

Nous nous sommes concentrés sur la façon dont les données audios sont représentées en clusters en termes d'habitat et de variation temporelle. Pour montrer le regroupement des données au fil des heures, des jours, selon la localisation ou l'habitat, nous avons utilisé des UMAP sur les données en 128 dimensions. L'Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) est une technique de réduction de dimension qui peut être utilisée pour la visualisation, ainsi que pour la réduction de dimension non linéaire générale.

Dans notre cas, l'UMAP représente la distribution des caractéristiques sonores pour les différents points, habitats (forêt, forêt avec train, ville, etc.), et sur les plages de temps. A partir de la distribution montrée dans l'UMAP ci-dessous, nous pouvons comprendre la couverture uniforme des caractéristiques sonores. Elle est représentée par des couleurs différentes pour chaque habitat.



Fig. 3. Représentation de l'interface de la plateforme et d'une représentation UMAP des données des corridors de Chamonix pour une journée.

Enfin, dans ce rapport nous abordons également le pourcentage de couverture entre les habitats et leurs visualisations dans différents types de graphiques. Pour ce faire, nous avons calculé un pourcentage de recouvrement des espaces sonores. Il est défini comme le pourcentage de la différence entre les volumes des caractéristiques extraites de deux enregistreurs différents. Le pourcentage de couverture sera calculé entre les paires d'enregistreurs pour obtenir la matrice de distance entre chaque paire d'enregistreurs.

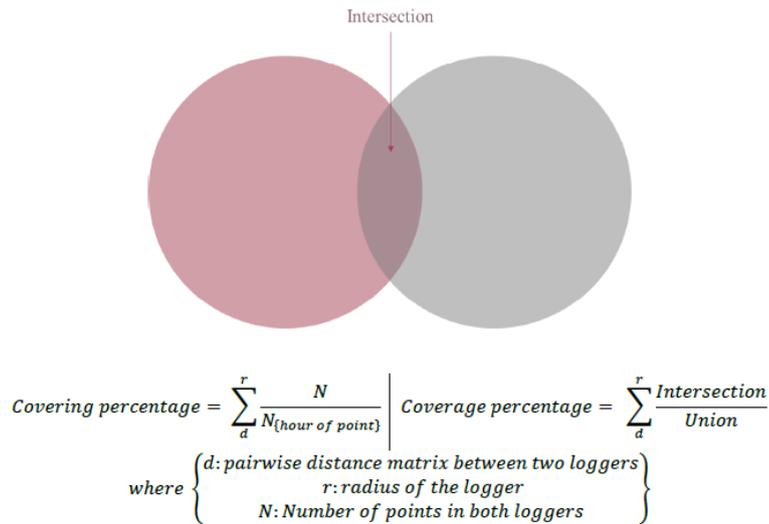


Fig. 4 : Proposition de l'indice de similarité via le recouvrement des espaces sonores à partir des volumes définis par notre plateforme numérique.

4.5.2 Analyses par indices

Du fait de la démocratisation de l'utilisation d'enregistreurs acoustiques autonomes et donc à la collecte de données sur de larges échelles temporelles et spatiales, ces dernières années ont vu l'émergence d'une nouvelle discipline nommée l'écoacoustique faisant le pont entre acoustique et écologie. Comparée à la bioacoustique, on opère donc ici à un changement d'échelle, en s'intéressant non plus à l'individu ou à l'espèce mais à de grandes structures écologiques, comme la population, la communauté ou le paysage. Afin de permettre une analyse quantitative des paysages sonores enregistrés, des descripteurs appelés indices acoustiques ont été développés. Par le biais de formules mathématiques appliquées au signal sonore, ces indices permettent de quantifier diverses grandeurs. De nombreux indices acoustiques 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, nous avons sélectionné 8 indices écoacoustiques pertinents. Ils sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

Nom indice	Référence	Description
Acoustic Complexity Index ACI	Pieretti et al. 2011	L'ACI serait lié à la biophonie et mesure la variation d'intensité d'un enregistrement donné sur des fréquences changeantes (Pieretti, Farina & Morri 2011). Cet indice a été développé pour être faiblement sensible au bruit de fond (sons persistants d'intensité constante). Plus le score de l'ACI est élevé, plus la biophonie serait importante.
Temporal Entropy Ht	Towsey et al. 2014	L'entropie temporelle reflète la régularité de l'amplitude d'un signal dans le temps. L'indice passe de 0 (pour un seul évènement sonore ponctuel) à 1 (signal uniforme dont l'énergie est répartie équitablement sur toute sa durée. Ht s'est avérée être positivement associée à la richesse en espèces observées (Depraetere et al., 2012).
Frequency Entropy Hf	Sueur et al. 2008	L'entropie fréquentielle reflète la régularité de l'amplitude d'un signal sur toute la gamme des fréquences qui le composent, c'est-à-dire son spectre. L'indice passe de 0 (pour un seul son pur à une fréquence donnée) à 1 (signal uniforme dont l'énergie est répartie équitablement sur l'ensemble des bandes de fréquences).
Median of the envelope MED	-	MED est la médiane de l'enveloppe de la forme d'onde. 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.
Acoustic Diversity Index ADI	Villanueva-Rivera et al. (2011)	L'indice de diversité acoustique augmente avec la régularité des bandes de fréquences. Un signal uniforme (qui contient de l'énergie dans toutes les bandes de fréquences ou complètement silencieux) induit une valeur d'ADI élevée, tandis qu'un son pur (c'est-à-dire toute l'énergie dans une seule bande de fréquences) induit une valeur d'ADI plus proche de 0.
Equivalent Continuous Sound Level Leq_T	-	L'indice Leq_t (niveau acoustique équivalent) est une mesure classique du domaine de l'acoustique. Il représente le niveau sonore d'un son continu qui produirait la même énergie que le signal analysé pendant une période définie (ici 1 minute).

Les résultats présentés dans ce rapport sont issus de spectrogrammes et des indices calculés sous Python (version 3.8.8) à l'aide du package *scikit-maad* (version 1.3, <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 ;
- ACI : pas de paramètres à fixer ;
- Ht : compatibility = 'QUT', mode = 'fast', Nt (taille de chaque fenêtre) = 512 points ;
- Hf : compatibility = 'QUT' ;
- 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;
- ADI : fmin = 0, fmax = 2000, bin_step = 1000, dB_threshold = -50, index = 'shannon';
- Leq_T : gain = 42.

Les 8 indices écoacoustiques sélectionnés ont été calculés pour chaque fichier de 1 minute. L'ensemble des résultats a été stocké dans une matrice à 3 dimensions (8 indices, 36 positions de déploiement, 18576 échantillons temporels).

5 Résultats

5.1 Principaux résultats sur les réseaux de neurone et UMAP

5.1.1 Similarité et évolution temporelle des caractéristiques du paysage sonore par UMAP :

Les projets de suivi des paysages sonores et de la biodiversité acoustique génèrent une quantité importante de signaux sonores et utilisent de nouvelles méthodes calculatoires du traitement du signal et de Machine Learning. Pour être à la hauteur des enjeux, nous développons une plateforme numérique avec un catalogue/une base de données pour permettre l'utilisation et le partage des enregistrements de manière efficace. Comme présenté précédemment, notre plateforme utilise de nouvelles méthodes de discrimination et de classification des signaux sonores en utilisant l'apprentissage profond de réseaux d'Intelligence Artificielle (Sethi et al 2020). Elle permet donc d'analyser rapidement la composition des paysages sonores et d'avoir une représentation cartographique de la distribution spatiale et temporelle de la biodiversité sonore dans les corridors (Fig. 5).

Dans un souci d'efficacité et de compréhension, nous avons commencé par analyser quelques enregistrements ciblés sur un transect (9,10,11 et 12) sur un seul corridor et sur une période de 3 jours.

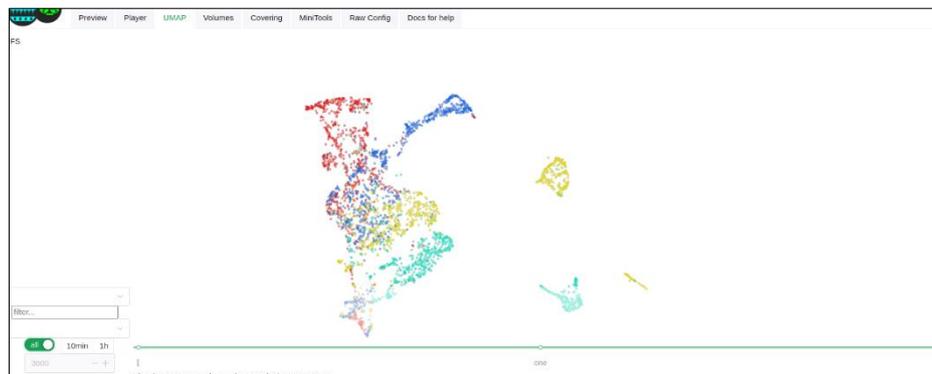


Fig.5 : représentation des UMAP pour le corridor de Chamonix pour les enregistreurs 9,10,11 et 12 pour la période P1 du 25 au 28 mars. Chaque point représente la projection des caractéristiques acoustiques de chaque enregistrement issu des 128 dimensions du réseau de neurones CNN. Chaque couleur représente un enregistreur.

L'analyse de cette figure montre que sur cette période, une partie des paysages acoustiques est structurellement très différente entre les enregistreurs. Par contre, une partie présente des caractéristiques communes entre les enregistreurs.

En utilisant la barre de défilement, nous pouvons voir la distribution sur les unités de temps (heures/jour, jour/semaine ou mois). En outre, nous pouvons changer la représentation des données en termes de temps (1 seconde, 1 minute, 1 heure ou 1 jour). Nous pouvons également filtrer les données que nous voulons afficher en fonction de l'habitat. Lorsque nous exécutons l'UMAP, nous obtenons plusieurs graphiques, chacun représentant une gamme différente de largeurs de bande. Ainsi la coloration de l'UMAP en fonction des habitats montre également des différences acoustiques entre les habitats (Fig. 6).



Fig. 6 : Représentation de l'UMAP en fonction des habitats durant toute la journée du 4 avril 2021. ● Forêt ● Forêt avec le train ● Anthropisé ● Milieu ouvert

Une étape également très intéressante est de regarder la dynamique temporelle des paysages sonore et d'analyser l'évolution au cours de la journée. Ainsi, si l'on représente les UMAP à différentes heures, on peut se rendre compte qu'en début et fin de journée chaque habitat a une structure acoustique bien différente. Ceci montre une forte similarité des structurations acoustiques au sein des habitats mais une forte séparation entre les habitats le matin et le soir. C'est à dire une faible connectivité structurelle entre les habitats durant les heures où il y a peu de bruit anthropique. Par contre, durant la journée, les bruits anthropiques se font entendre sur l'ensemble des capteurs, masquant et homogénéisant tout le paysage sonore, et témoignant ainsi des très fortes contraintes de l'anthropophonie dans les corridors.

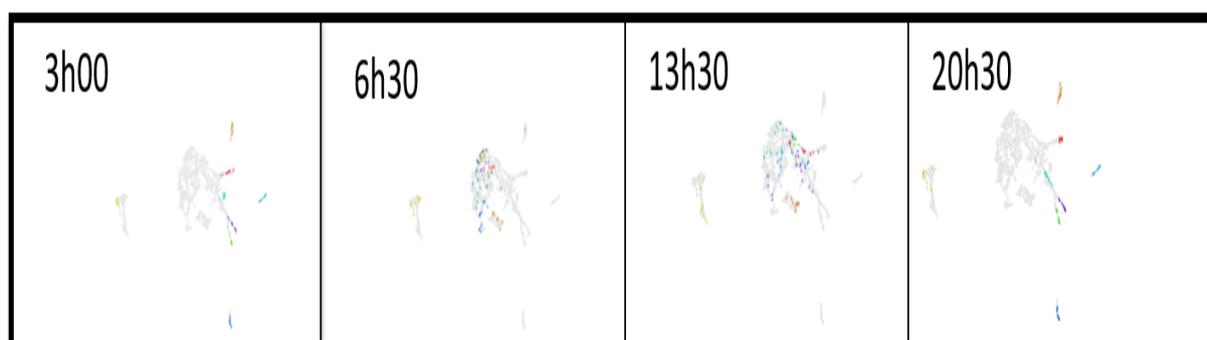


Fig. 7 : Représentation des UMAP à différents horaires au cours de la journée en fonction des habitats.

La dernière représentation des UMAP est la représentation globale sur l'ensemble des enregistreurs et l'ensemble de jours. Bien que l'on retrouve les mêmes patterns que précédemment, son interprétation et sa lecture restent délicates car l'UMAP inclut toutes les variabilités temporelles (heures, jours, semaines) mais également la variabilité au sein d'un même habitat.

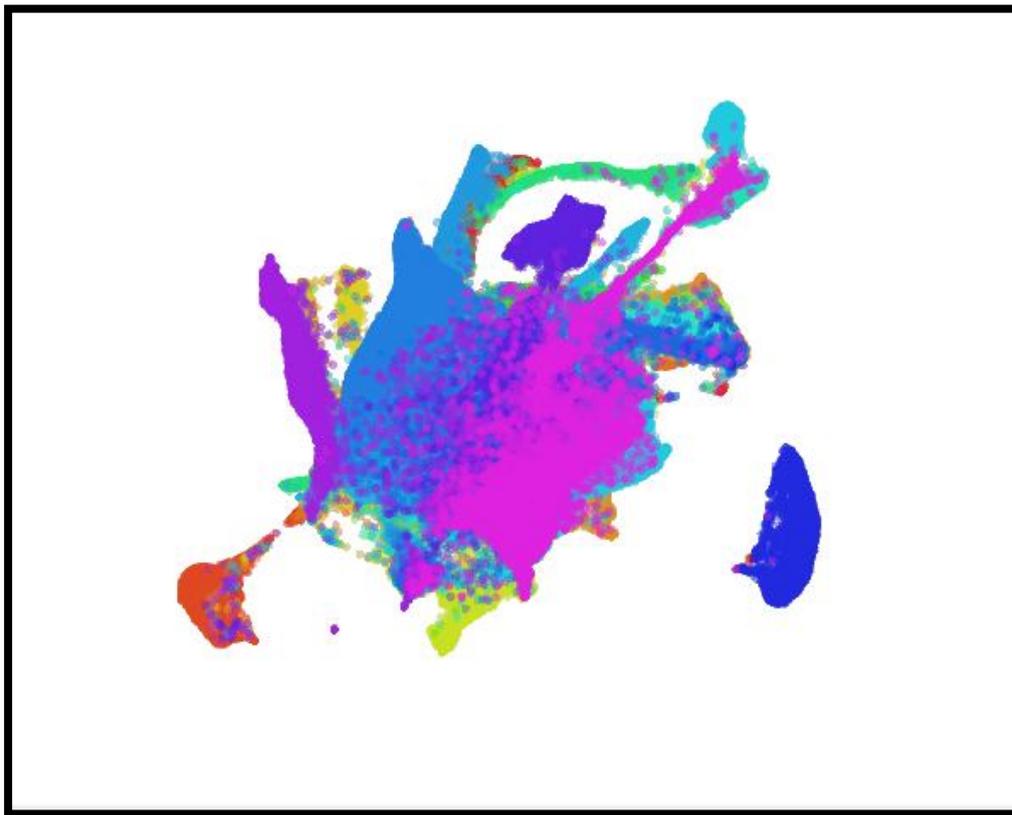


Fig. 8 : Représentation des UMAP sur l'ensemble des données de la première période du corridor de Chamonix.

5.1.2 Volumes et recouvrements

Pour simplifier la lecture des UMAP nous avons analysé les volumes des paysages acoustiques. Ces volumes représentent la couverture acoustique utilisée par chaque projection des caractéristiques acoustiques de chaque enregistrement issu des 128 dimensions du réseau de neurones CNN. Ainsi, si on représente l'évolution des volumes acoustiques de chaque habitat durant une journée (Fig 9), nous pouvons clairement voir des volumes plus faibles en début et fin de matinée, car il n'y a pas de bruit anthropique comme ce que nous avons vu précédemment avec les UMAP. Par contre, bien que les caractéristiques acoustiques soient différentes (cf UMAP), les volumes acoustiques restent relativement identiques entre les différents habitats.

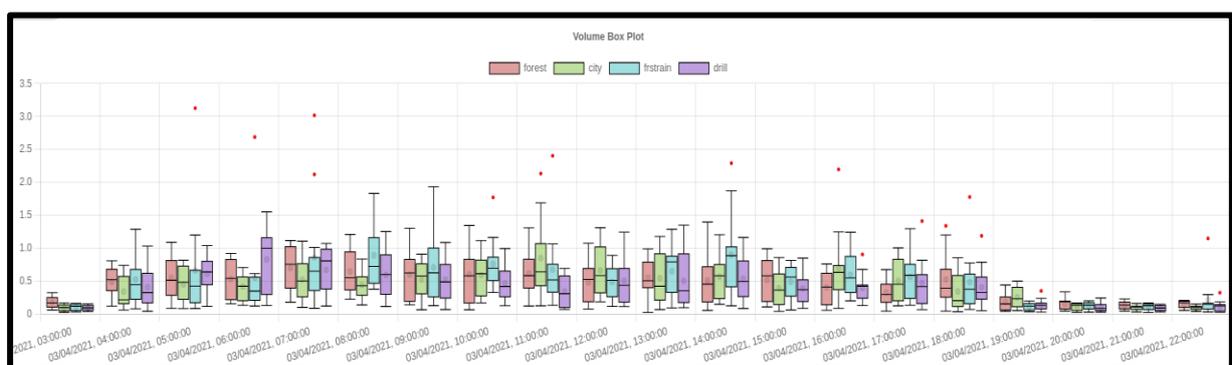


Fig. 9 : représentation des variations journalières des volumes acoustiques utilisés par les différents habitats, qui seront utilisés pour la suite du projet par grands types d'habitats.

A partir des volumes, nous pouvons calculer un pourcentage de recouvrement des espaces sonores. Il est calculé par le pourcentage de la différence entre les volumes des caractéristiques extraites de deux enregistreurs différents. Ainsi, si on représente le % de recouvrement entre les différents enregistreurs, on peut voir rapidement lesquels sont complètement différents de tous les autres et à quel moment il y a le maximum de recouvrement des paysages acoustiques. Cela permet de suivre l'évolution temporelle de la connectivité structurelle au cours du temps. Cette partie est encore en exploration et en développement

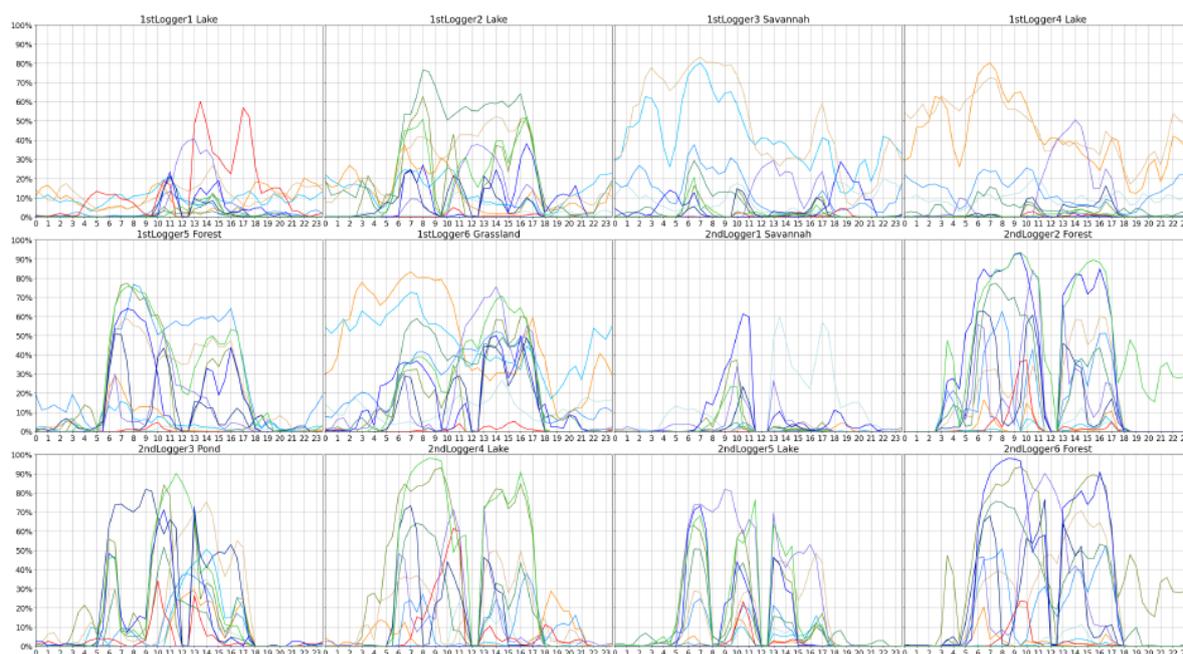


Fig. 10 : représentation des variations journalières de recouvrement des volumes acoustiques d'un habitat avec tous les autres.

5.2 Principaux résultats sur les indices

Les figures présentées ci-après permettent de mettre en évidence les principales observations et interprétations. Les indices acoustiques pouvant évoluer en fonction de nombreux facteurs et en particulier en fonction de la position de déploiement et de la période (heure, jour de l'année) échantillonnée, plusieurs représentations complémentaires (cartes, séries temporelles, graphiques polaires) sont présentées afin d'analyser les résultats sous des perspectives différentes. Dans la suite de ce rapport, certains résultats sont présentés en regard d'une figure particulière mais ils peuvent être également retrouvés sous un autre angle sur une autre figure. *L'intégralité des figures sont consultables au format png dans l'archive "Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip". Les figures présentées dans ce rapport sont disponibles à la racine de l'archive, les figures Annexes sont disponibles dans le sous-dossier « Annexes ».*

5.2.1 Analyse par enregistreur – Détection des cas particuliers

La Figure 11 présente, pour chaque position de déploiement de la vallée CH, les valeurs des 8 indices acoustiques moyennés sur les périodes P1 et P2. Ce graphique radar permet facilement de repérer d'éventuels valeurs aberrantes. Les enregistreurs suivants se distinguent des autres :

- CH2 présente de fortes valeurs pour les indices Leq_t et MED, traduisant de forts niveaux sonores. L'enregistreur a la particularité d'être à quelques mètres seulement de la rivière de l'Arve. L'écoute de quelques fichiers audio et l'inspection des photos d'installation permettent de confirmer que c'est le son qu'elle génère qui est responsable de ces valeurs particulières.
- CH7 est caractérisé par un indice ACI particulièrement élevé, traduisant une forte complexité du spectrogramme, c'est-à-dire des variations rapides de son et changeantes en fréquence. L'écoute de quelques fichiers audio, couplée à l'inspection des photos d'installation permet d'affirmer que ces valeurs sont dues à la présence d'un abreuvoir à proximité immédiate de l'enregistreur dont l'alimentation en eau génère un bruit constant. Ce son étant extrêmement localisé, les signaux sonores enregistrés par CH7 ne sont pas représentatifs du paysage sonore de la zone de rayon 50m autour de l'enregistreur (zone retenue pour qualifier l'habitat) et encore moins de la zone de 300m² liée à l'échantillonnage spatial choisi. Pour cette raison, cet enregistreur est exclu de l'analyse.
- CH18 présente une valeur de Leq_t particulièrement faible. A l'écoute, le niveau sonore est très faible, expliquant la valeur faible de Leq_t. L'hypothèse d'une zone particulièrement silencieuse est facilement écartée grâce aux résultats des tests acoustiques des enregistreurs : ceux-ci avaient permis de détecter un problème de gain faible sur cet enregistreur qui avait ensuite été remplacé pour les périodes P3 et P4. Les périodes P1 et P2 de CH18 sont donc exclues de l'analyse.

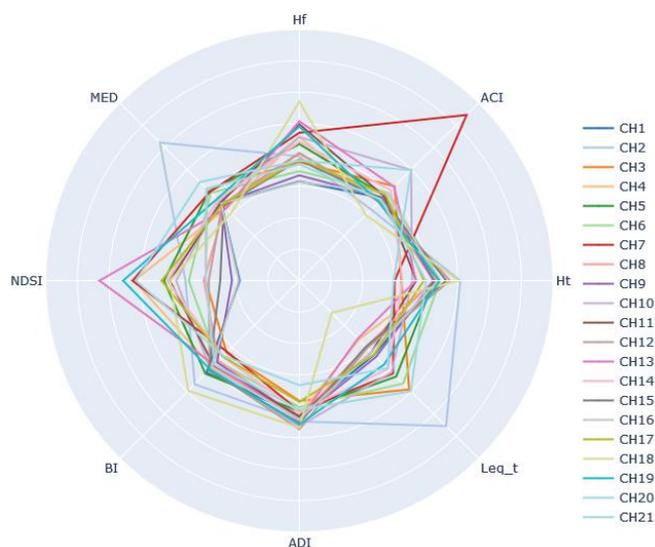


Figure 11 : Représentation des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, ACI, Ht, Leq_t, ADI, BI, NDSI et MED) pour chacun des enregistreurs du site d'étude CH. Chaque courbe correspond à un enregistreur. Les indices écoacoustiques sont des indices moyennés sur les périodes P1 et P2.

La Figure12 présente les valeurs d'indices pour chaque position d'enregistreur du site PM. Globalement, les valeurs d'indices apparaissent légèrement plus hétérogènes pour le site CH. Les enregistreurs suivants se distinguent des autres :

- PM4 est caractérisé par de faibles valeurs de Hf et de ADI, traduisant une concentration d'énergie à certaines fréquences. A l'écoute de quelques fichiers, il semblerait que le paysage sonore soit caractérisé par des bourrasques de vent relativement plus nombreuses que sur les

autres positions de déploiement, probablement en raison de sa localisation et de son habitat (prairie dégagée).

- PM8 présente de très fortes valeurs pour les indices Leq_t et MED. L'écoute et l'inspection des photos permettent de tirer la même conclusion que pour CH2 : ces valeurs sont dues au bruit généré par la rivière de cette vallée, l'Arly.

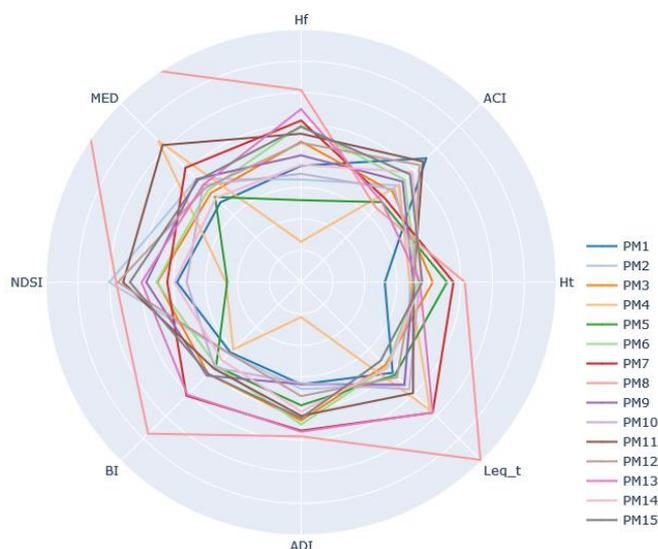


Figure 12 : Représentation des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, ACI, Ht, Leq_t, ADI, BI, NDSI et MED) pour chacun des enregistreurs du site d'étude de PM. Chaque courbe correspond à un enregistreur. Les indices écoacoustiques sont des indices moyennés sur les périodes P1 et P2.

► Pour plus de détails, les figures radar_CH_P1-P2-P3b.png et radar_PM_P1-P2-P3b.png inclus dans l'archive Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip montrent les graphiques radars de chaque enregistreur en distinguant les périodes P1, P2 et P3b.

Ces résultats peuvent être confrontés aux tests acoustiques des enregistreurs ayant eu lieu entre les périodes P2 et P3 :

- Certains enregistreurs avaient une membrane percée (CH13, CH17, PM2). Cela ne semble pas générer de valeurs aberrantes pour les indices acoustiques qui sont donc conservés pour la suite de l'analyse. En effet, les tests acoustiques mettent en évidence une augmentation légère du gain si la membrane du boîtier est percée mais le profil de la réponse en fréquences n'est pas significativement modifié.
- Un bruit de fond important a été détecté sur l'enregistreur PM13 mais les indices acoustiques ne semblent pas particulièrement aberrants et aucun problème n'a été détecté lors d'écoutes de quelques fichiers audio. Cet enregistreur est donc conservé dans l'analyse (le bruit de fond a pu apparaître après le démontage, à l'issue de la période P2).

Entre P2 et P3, les boîtiers à membrane percée (CH13, CH17, PM2) ainsi que les enregistreurs CH18 et PM13 ont été remplacés. Par abus de langage et souci de simplification, on désigne par la suite les positions de déploiement par le mot « enregistreur » et par le nom des enregistreurs initialement déployés (e.g. l'enregistreur CH18 fera référence à la position à laquelle l'enregistreur CH18 a été déployé en P1/P2 bien qu'il ait été remplacé par un autre enregistreur à partir de P3).

5.2.2 Corrélation entre indices acoustiques

Puisque certains paramètres acoustiques sont communs à certains indices écoacoustiques, les 8 indices sélectionnés ne sont pas, par définition, complètement indépendants. Pour étudier cette dépendance, la Figure 13 présente la matrice de corrélation entre chacun des 8 indices, sur l'ensemble des enregistrements analysés. Elle permet de noter les corrélations suivantes :

- ADI et Hf ont un coefficient de corrélation de 0.69. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces deux indices réagissent positivement aux fortes variations entre bandes de fréquence.
- Leq_t et MED ont un coefficient de corrélation de 0.68. En effet, ces indices sont tous deux basés sur l'amplitude du signal sonore.
- Hf et ACI ont un coefficient de corrélation de -0.47. Ceci traduit le fait que les événements sonores brefs et intenses augmentent la complexité du spectre (variations rapides) et réduisent l'entropie temporelle (énergie moins répartie).

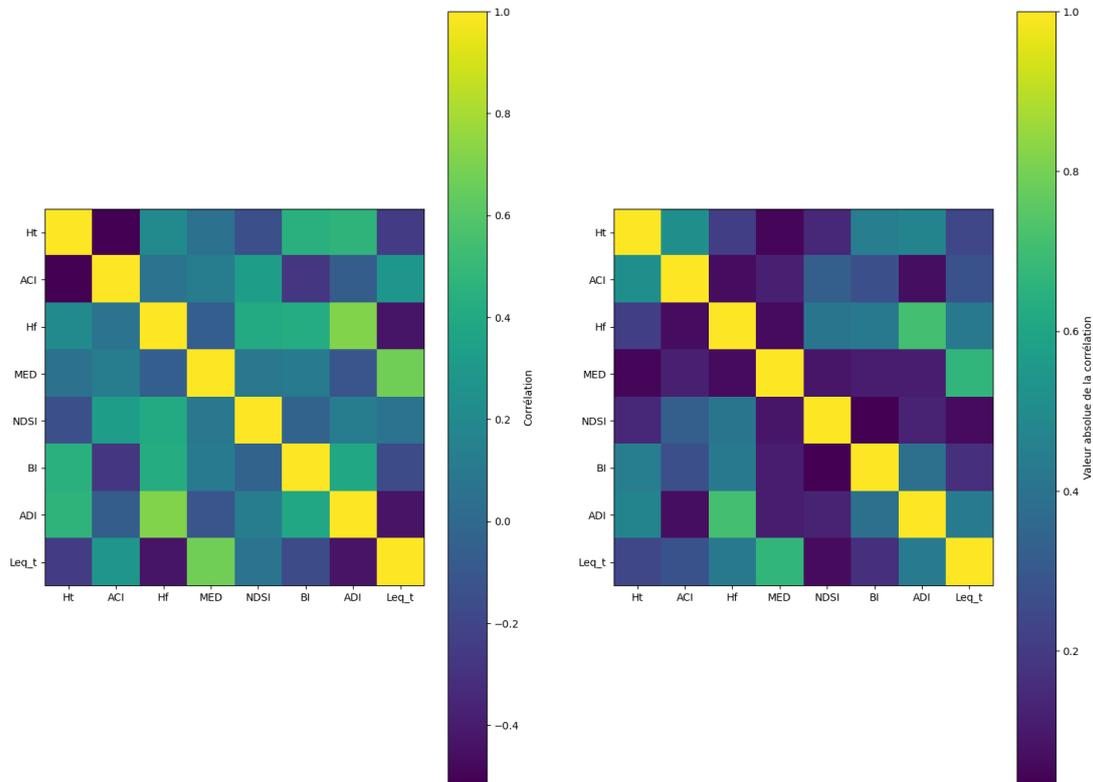


Figure 13 : Matrices de corrélation des 8 indices écoacoustiques considérés dans cette étude (Hf, ACI, Ht, Leq_t, ADI, BI, NDSI et MED) moyennés sur l'ensemble des données : pour les deux sites d'étude (CH et PM) et les trois périodes d'enregistrement (P1, P2 et P3). La figure de gauche représente les corrélations entre indices écoacoustiques incluses entre -1 (corrélation négative) et +1 (corrélation positive). La figure de droite représente les corrélations entre indices écoacoustiques en valeur absolue (0 : corrélation faible ; 1 : corrélation forte).

5.2.3 Analyse spatiale

5.2.3.1 Site d'étude 1 : Chamonix (CH)

L'objectif de ce projet est de caractériser un corridor écologique. Il semble alors pertinent de représenter les indices acoustiques sur des cartes des sites d'enregistrement concernés. La Figure 14 montre les valeurs des 8 indices pour les enregistreurs du site CH sur les périodes P1 et P2. La valeur de chaque indice est codée par une échelle de couleur (CH7 et CH18, ayant été retirés de l'analyse, ils apparaissent en noir). Ces valeurs sont représentées dans des carrés de 300m de côté. Toutefois, elles décrivent uniquement le paysage sonore enregistré à l'endroit précis du déploiement.

Le premier résultat demeure les fortes disparités entre enregistreurs selon l'indice observé. Cela traduit une grande diversité de paysages sonores. Deuxièmement, aucun motif spatial net, en lien avec la géographie de la vallée n'apparaît, contrairement à ce à quoi il aurait été possible de s'attendre et à une des hypothèses formulées à l'origine de ce projet.

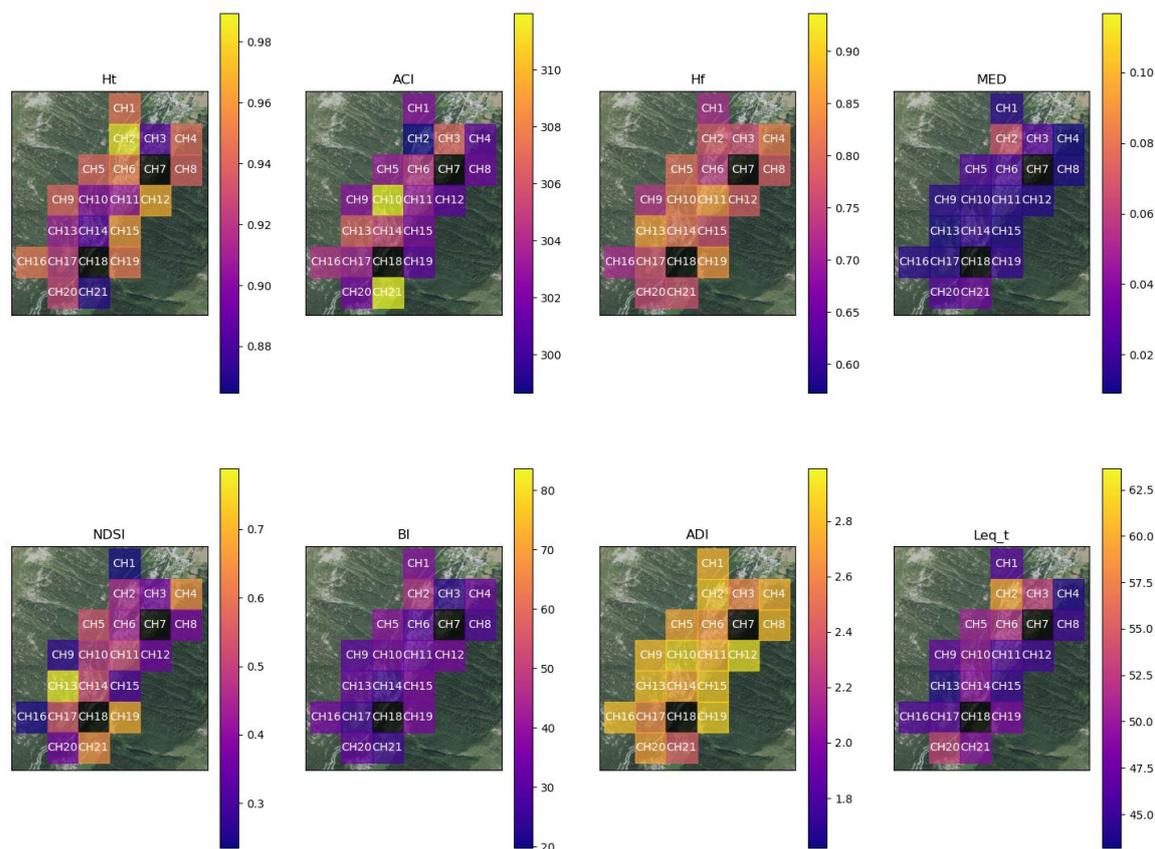


Figure 14 : Représentation spatiale des valeurs d'indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI et Leq_t) pour chaque enregistreur du site d'étude CH sous forme de carrés de 300×300m autour de la position GPS de chaque enregistreur (cf. texte). Les valeurs d'indices écoacoustiques représentées pour chaque enregistreur sont les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des données des périodes P1 et P2.

► Pour chaque période P1, P2, P3 et P3b : une représentation spatiale des indices acoustiques pour la vallée CH est disponible dans le fichier archive Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip (CH_map_P1.png, CH_map_P2.png, CH_map_P3.png, CH_map_P3b.png).

5.2.3.2 Site d'étude 2 : Praz-sur-Arly/Megève (PM)

Comme pour le site CH, les indices acoustiques de PM présentent de fortes disparités entre enregistreurs et aucun net motif spatial ne semble émerger (Figure 15). En revanche, certains indices (en particulier NDSI et ACI) présentent des valeurs nettement plus élevées pour la plupart des enregistreurs de la vallée PM que pour ceux de la vallée CH. Cette différence entre les deux sites pourrait s'expliquer par l'influence des habitats sur le paysage sonore et donc les valeurs d'indices écoacoustiques.

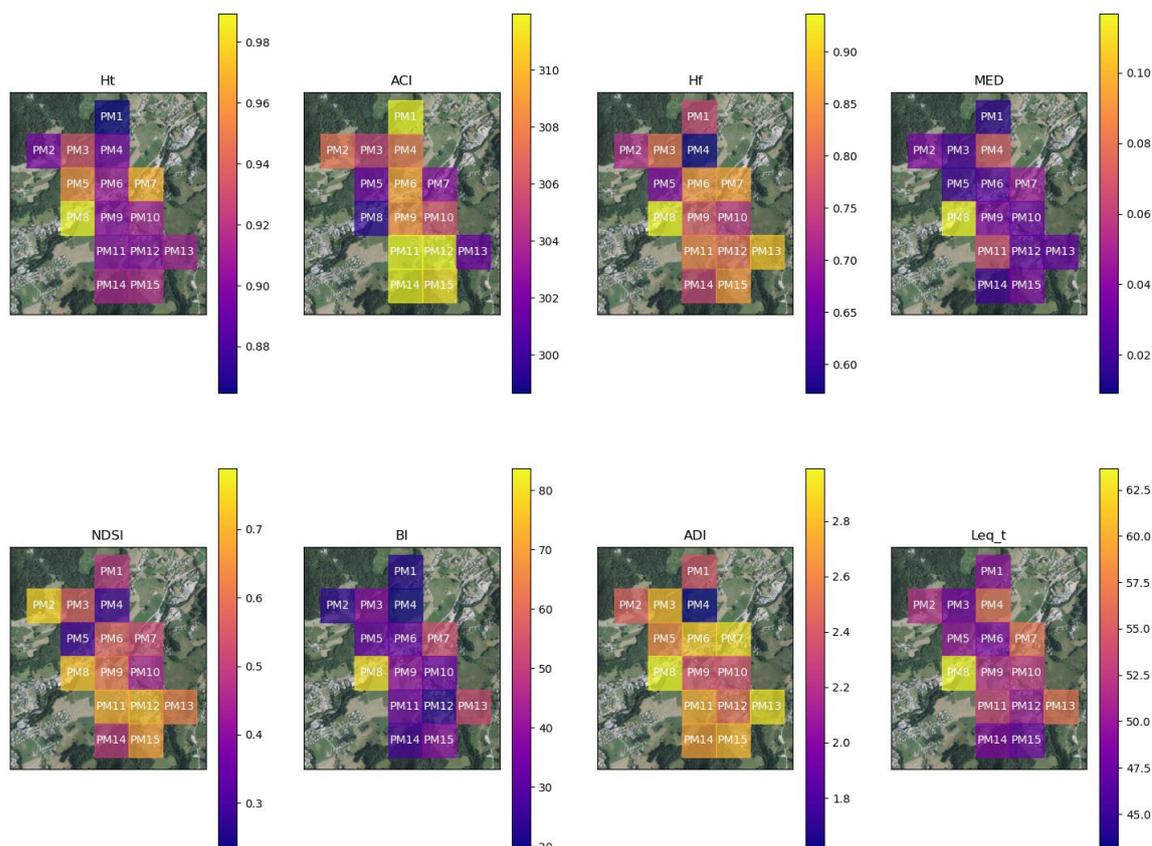


Figure 15 : Représentation spatiale des valeurs d'indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI et Leq_t) pour chaque enregistreur du site d'étude de PM sous forme de carrés de 300x300m autour de la position GPS de chaque enregistreur (cf. texte). Les valeurs d'indices écoacoustiques représentées pour chaque enregistreur sont les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des données des périodes P1 et P2.

► Pour chaque période P1, P2, P3 et P3b : une représentation spatiale des indices acoustiques moyen sur le site d'étude de Praz-sur-Arly / Megève est disponible dans le fichier archive Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip (PM_map_P1.png, PM_map_P2.png, PM_map_P3.png, PM_map_P3b.png).

5.2.4 Analyse par habitat

5.2.4.1 Habitats majoritaires

Afin d'étudier l'influence de l'habitat sur le paysage sonore, chaque position de déploiement est caractérisée par l'habitat majoritaire présent dans un rayon de 50m autour de chaque enregistreur. 5 types d'habitats ont été identifiés :

- **Milieux ouverts** : habitats incluant les prairies, les cultures et les pelouses de montagne,
- **Forêts de conifères,**
- **Forêts de feuillus,**
- **Rivière** : habitats caractérisés par la présence proche d'une rivière,
- **Milieux anthropisés**: habitats englobant les zones artificialisées (habitat résidentiel rural et urbain, zones industrielles/commerciales, réseaux de transports, parkings, décharges, ...).

La Figure 16 présente l'habitat majoritaire dans un rayon de 50m autour de chaque enregistreur déployé dans les deux vallées d'étude (sur la Figure , par soucis de comparaison avec les figures précédentes, l'habitat est représenté par un carré de 300m de côté, autour de la position de chaque enregistreur). La vallée CH possède une forte proportion d'habitats "forêts de conifères" contrairement à la vallée PM pour laquelle les habitats "milieux ouverts" dominent.



Figure 16 : Représentation des habitats majoritaires (milieux ouverts, forêts de conifères, forêts de feuillus, rivière, milieux anthropisés) relevés dans un rayon de 50m autour de la position GPS de chacun des enregistreurs. Figure de gauche : site d'étude CH. Figure de droite : site d'étude de PM. Un code couleur est appliqué sur un carré de 300×300m autour de la position GPS de chaque enregistreur (cf. texte).

5.2.4.2 Analyse par habitat

Afin d'étudier l'influence de l'habitat, les valeurs d'indices acoustiques de tous les enregistreurs sont moyennées entre elles, par catégorie d'habitat, indépendamment du site d'enregistrement (voir Figure 17).

L'analyse de cette figure permet de tirer plusieurs résultats :

- Les 2 enregistreurs dont l'habitat majoritaire est noté "rivière" sont caractérisés par de fortes valeurs de MED et Leq_t en raison du son de la rivière (comme vu précédemment). On observe également de forts niveaux d'entropie (H_f et H_t) et une faible complexité (ACI) qui traduisent un paysage sonore très homogène : les événements isolés en temps ou en fréquence sont masqués par le bruit de fond imposé par la rivière.
- Les forêts de conifères et de feuillus sont caractérisées par une entropie temporelle H_t plus forte que les milieux ouverts et anthropisés, indiquant des sons moins secs et plus diffus dans le temps. Ceci pourrait être expliqué par le phénomène de réverbération des ondes sonores sur les nombreuses surfaces irrégulières que présentent les arbres, générant une réverbération diffuse. Ce phénomène de diffusion est absent des milieux ouverts où il n'y a pas de surfaces de réflexion. Les milieux anthropisés se caractérisent par d'importantes surfaces plates et très réfléchissantes générant des échos mais n'induisant pas un champ aussi diffus qu'en forêt.
- Les forêts de feuillus se distinguent des forêts de conifères par des valeurs plus fortes de MED et Leq_t, indiquant des niveaux sonores globalement plus élevés. Une écoute active (annotation) plus poussée des fichiers audio correspondant permettraient peut-être d'apporter des éléments d'interprétation de cette différence.
- Les milieux ouverts (non-anthropisés) sont caractérisés par de fortes valeurs d'ACI et NDSI, ce qui semble indiquer une plus grande biophonie (ensemble des sons produits par les animaux). Ces valeurs sont particulièrement élevées sur la période P2 (voir annexes) et, quelques écoutes semblent indiquer les stridulations d'insectes typiques des milieux ouverts, ayant pour effet d'augmenter ces valeurs d'indices.

Contrairement à la vallée CH, la vallée PM est composée majoritairement de milieux ouverts. Les résultats observés sont en phase avec cette différence d'habitat les indices NDSI et ACI reflètent notamment bien cette différence entre les deux vallées.

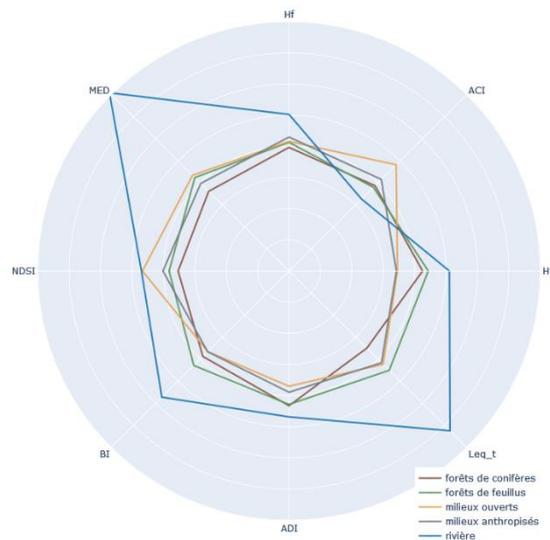


Figure 17 : Représentation des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, ACI, Ht, Leq_t, ADI, BI, NDSI et MED) en fonction des habitats majoritaires (forêts de conifères, forêts de feuillus, milieux ouverts, milieux anthropisés, rivière) des enregistreurs PM et CH confondus. Les indices écoacoustiques sont des indices moyennés sur l'ensemble des enregistreurs de même habitat majoritaire, sur les périodes P1 et P2.

La Figure 18 met en évidence la variabilité intra-habitat. Cette variabilité est nettement inférieure à la variabilité inter-habitats. Ainsi, pour la suite de ce rapport, les enregistreurs sont groupés par habitat. La plupart des analyses ont toutefois été effectuées de manière individuelle pour chacun des 36 enregistreurs et sont consultables dans le fichier archive *Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip*.

► Pour plus de détails, les graphiques radar pour chaque période enregistrée sont disponibles dans l'archive *Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip* (P1 : *radar_global_habitat_P1.png* ; P2 : *radar_global_habitat_P2.png* ; P3 : *radar_global_habitat_P3.png* ; P3b : *radar_global_habitat_P3b.png*). De même, les annexes YY présentent les variations intra-habitat pour chaque habitat (P1 : *radar_habitats_P1.png* ; P2 : *radar_habitats_P2.png* ; P3 : *radar_habitats_P3.png* ; P3b : *radar_habitats_P3b.png*).

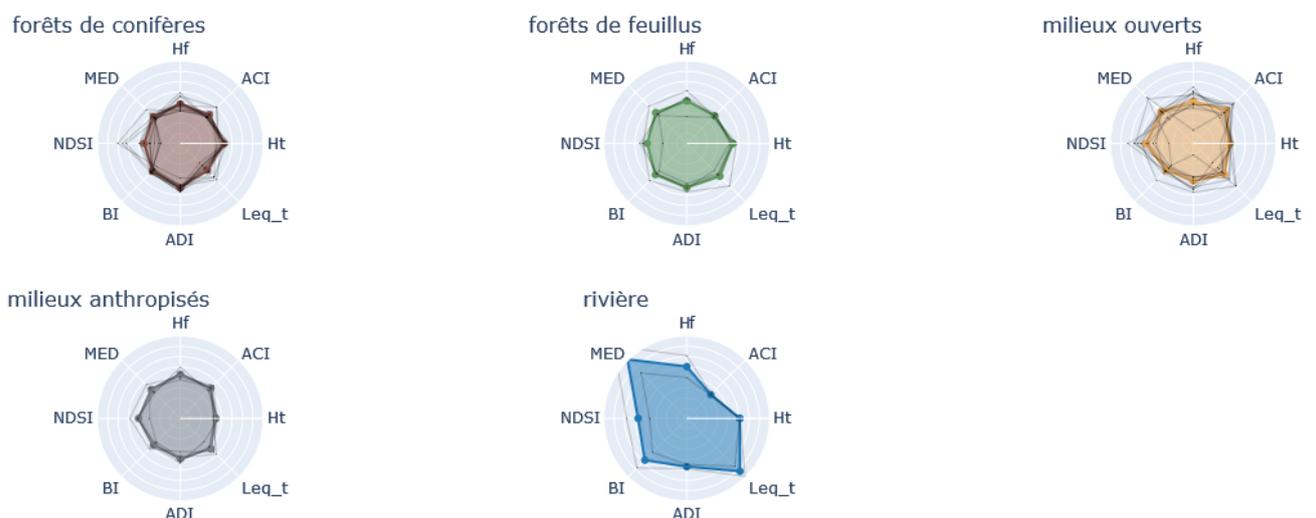


Figure 18 : Représentation des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, ACI, Ht, Leq_t, ADI, BI, NDSI et MED) pour chacun des habitats majoritaires (de gauche à droite puis de haut en bas : forêts de conifères (marron), forêts de feuillus (vert), milieux ouverts (orange), milieux anthropisés (gris), rivière (bleu)) des 2 sites d'étude confondus : PM et CH. Les zones et les lignes colorées correspondent aux indices écoacoustiques moyennés sur l'ensemble des enregistreurs de même habitat majoritaire, sur les périodes P1 et P2. Sur chaque graphique, les fines lignes noires correspondent aux indices écoacoustiques de chaque enregistreur appartenant à cette catégorie d'habitat.

5.2.5 Analyse temporelle

Si la position des enregistreurs et notamment l'habitat environnant semblent influencer significativement les indices écoacoustiques, cette partie vise à représenter les variations temporelles des indices acoustiques à différentes échelles.

5.2.5.1 Evolution temporelle selon la saison et l'année

La Figure 19 illustre les indices écoacoustiques pour chacune des 3 périodes d'enregistrement P1, P2 et P3b. Par rapport aux printemps 2021 et 2022 (respectivement P1 et P3b), la période d'été 2021 (P2) est marquée par des valeurs de MED et de Leq_t plus élevées traduisant de plus forts niveaux sonores. Plusieurs facteurs en sont potentiellement responsables : des orages d'été (peu probable), une propagation du son altérée en raison des plus fortes températures, une végétation plus développée et peut-être plus sonore quand il y a du vent mais aussi l'activité accrue des insectes émettant des sons (notamment stridulations) et une activité humaine plus intense due au tourisme. Les faibles variations observées entre printemps 2021 (P1) et printemps 2022 (P3) sont probablement en lien avec des différences de précocité entre les deux printemps, caractérisées par la température décalant les rythmes biologiques de la faune et de la flore. Sur ce point, il serait nécessaire de confronter des données météorologiques plus avancées.

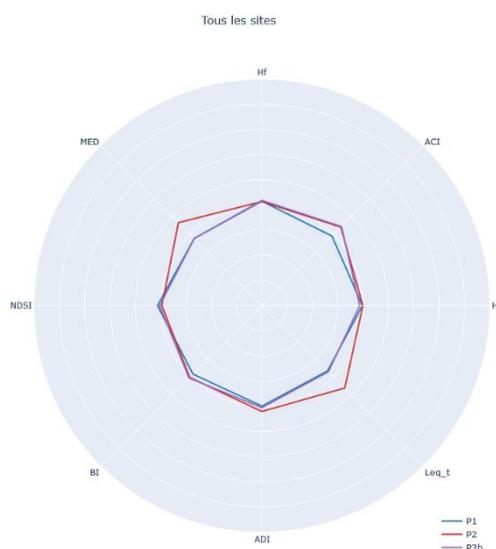


Figure 1 : Représentation des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, ACI, Ht, Leq_t, ADI, BI, NDSI et MED) moyennés sur l'ensemble des enregistreurs des deux sites d'études confondus : PM et CH, pour chacune des périodes d'enregistrement (P1 : courbe bleue, P2 : courbe rouge, P3b : courbe violette).

La Figure montre le passage du printemps à l'été (en 2021 : de P1 à P2) selon l'habitat. Comme vu précédemment, les valeurs de MED et de Leq_t augmentent pour tous les types d'habitats. Cependant, des différences entre habitats sont notables :

- Pour les milieux ouverts, les indices ACI, Hf, ADI et NDSI augmentent également, potentiellement en partie à cause de l'activité sonore des insectes beaucoup plus intense en été dans ce type de milieux.
- Pour les milieux anthropisés et les forêts de conifères, l'indice NDSI baisse, pouvant traduire une hausse de l'activité anthropique mais plus probablement une baisse de la biophonie et en particulier des chants d'oiseaux pour ces habitats.

La Figure 20 présente une évolution quotidienne des indices acoustiques au fil des 3 périodes analysées : P1, P2 et P3b. Cette figure permet de confirmer les résultats observés précédemment. Cependant, l'évolution jour après jour permet d'observer quelques éléments supplémentaires. En particulier, certains jours présentent des valeurs très faibles d'entropie temporelle Ht, associées à des valeurs très fortes de l'ACI. Ces événements sonores s'étalant sur 1 ou 2 jours et affectant la plupart des enregistreurs sont probablement liés à des conditions météorologiques particulières. La courbe des précipitations, tracée en bas à gauche de la Figure

21 indique que ces jours correspondent en partie aux jours de fortes pluies, par exemple vers le 08/04/2022. Le bruit de la pluie est caractérisé par de nombreux événements sonores brefs (gouttes d'eau) et augmentant ainsi l'entropie temporelle Ht et la complexité acoustique ACI. Enfin, la courbe de température moyenne (en bas à droite de la Figure 21) permet d'observer les profils de température du printemps 2021 et du printemps 2022, ce dernier étant caractérisé par un début du mois d'avril très froid, ce qui pourrait expliquer des différences de paysage sonore.

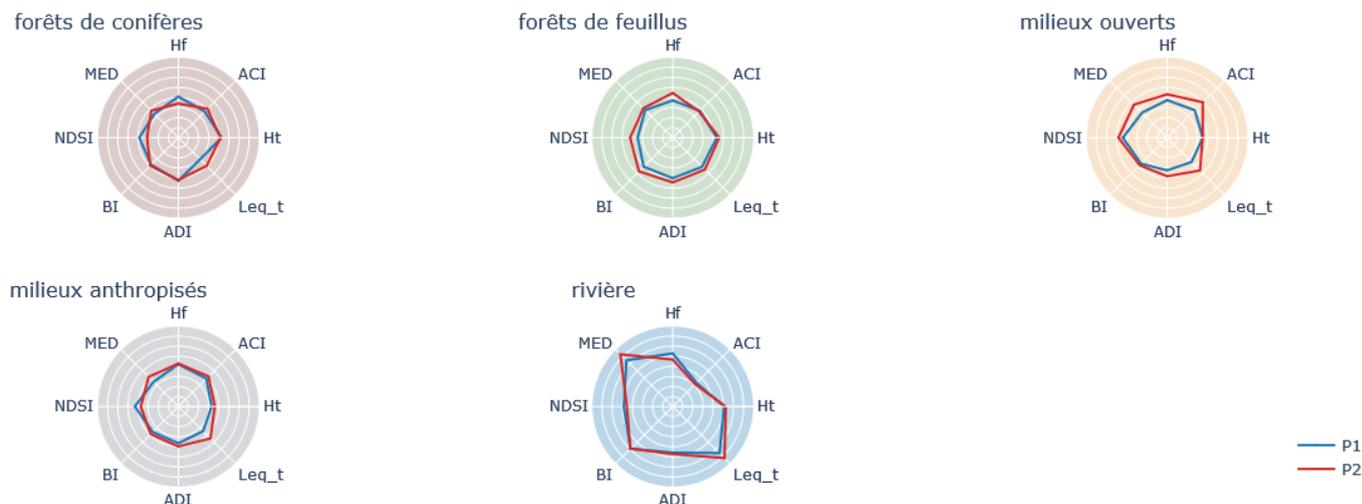


Figure 20 : Représentation des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, ACI, Ht, Leq_t, ADI, BI, NDSI et MED) pour chacun des habitats majoritaires (de gauche à droite puis de haut en bas : forêts de conifères (marron), forêts de feuillus (vert), milieux ouverts (orange), milieux anthropisés (gris), rivière (bleu)). Les indices sont moyennés sur l'ensemble des enregistreurs de même habitat majoritaire des deux sites d'étude PM et CH confondus, pour les périodes P1 (courbes bleues) et P2 (courbes rouges).

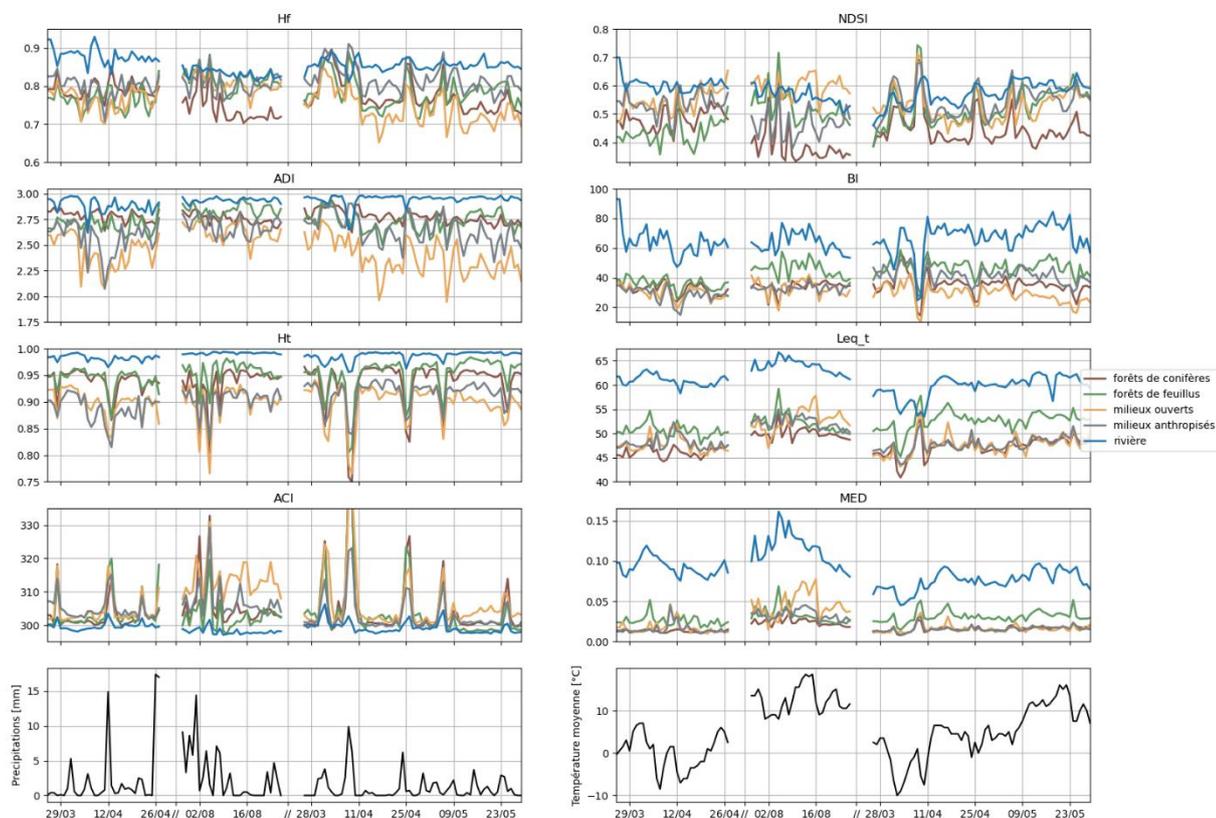


Figure 2 : 8 premières figures : évolution temporelle des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, NDSI, ADI, BI, Ht, Leq_t, ACI, MED) en fonction de l'habitat majoritaire, sur la totalité des périodes P1, P2 et P3. Les indices sont moyennés sur l'ensemble des enregistreurs de même habitat majoritaire des deux sites d'étude confondus - PM et CH - un point par jour. Figure du bas à gauche : évolution temporelle des précipitations moyennes, jour à jour (mm). Figure du

bas à droite : évolution temporelle de la température moyenne, jour à jour (°C). Les 3 périodes d'enregistrement (P1, P2 et P3) sont séparées sur l'axe des abscisses par le symbole //.

► Pour plus de détails, la matrice de corrélation entre les indices acoustiques et plusieurs variables liées aux conditions météorologiques est présentée sur la figure *weatherCorrelation.png* de l'archive *Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip*.

Enfin, l'activité humaine plus importante en été peut être caractérisée par une augmentation du trafic routier mesuré dans chaque vallée sur la route principale. Sur la Figure, le débit quotidien de véhicules est représenté pour chaque vallée en regard des indices écoacoustiques calculés sur les deux enregistreurs déployés les plus proches de la route (CH20 et CH3 ; PM6 et PM8). Les paysages sonores captés par ces enregistreurs demeurent, a priori, fortement affectés par le bruit du trafic routier et ce, principalement durant la journée (9h-19h, période durant laquelle le trafic routier est a priori plus intense que la nuit).

Si certains indices (notamment Leq_t pour l'enregistreur CH3) semblent légèrement corrélés au trafic routier, son influence ne semble pas un facteur primordial permettant d'expliquer la fluctuation des indices écoacoustiques des enregistreurs les plus proches de la route.

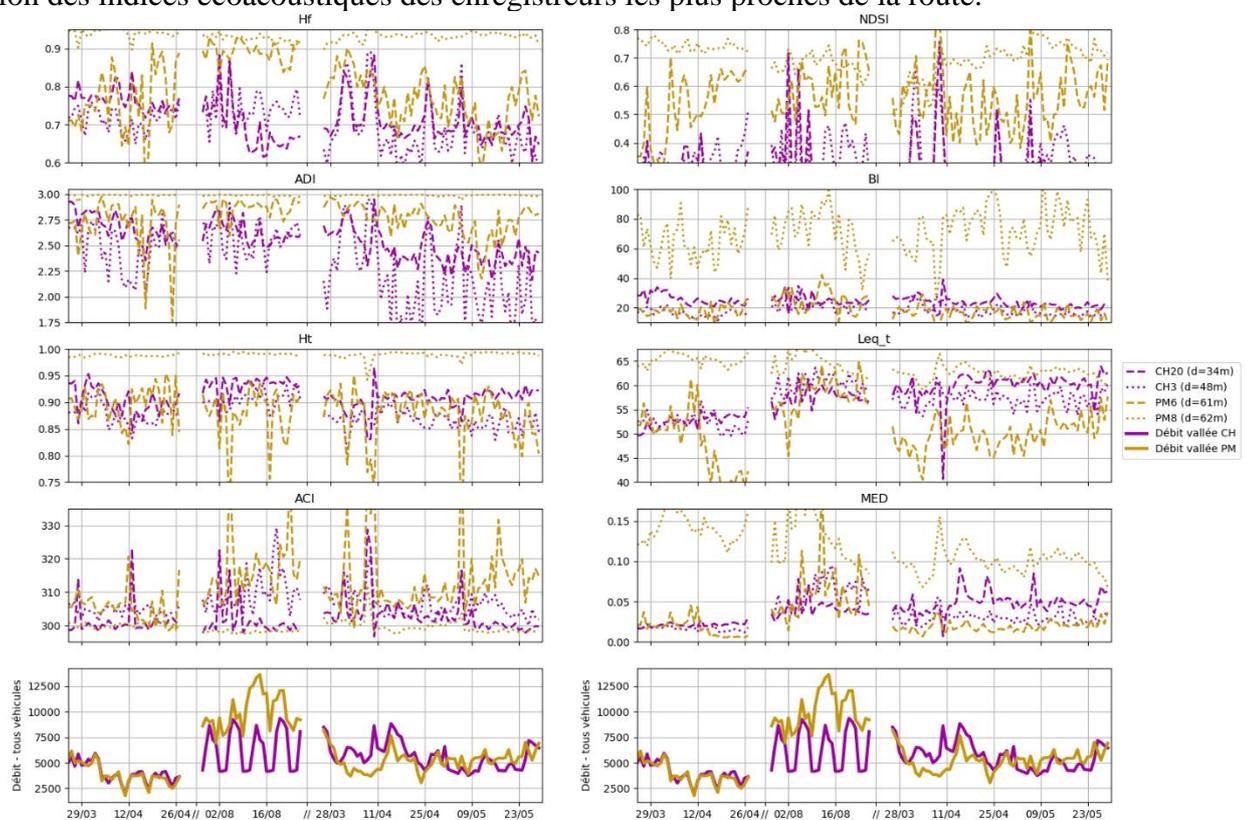


Figure 22 : 8 premières figures : évolution temporelle des 8 indices écoacoustiques considérés pour cette étude (Hf, NDSI, ADI, BI, Ht, Leq_t , ACI, MED) calculés pour les 4 enregistreurs les plus proches de la route : CH20 (34m de la route, ligne en tirets violets), CH3 (48m de la route, ligne pointillée violette), PM6 (61m de la route, ligne en tirets orange) et PM8 (62m de la route, ligne pointillée orange), sur la totalité des périodes P1, P2 et P3 mais uniquement dans l'intervalle 9h-19h, période la plus propice au trafic routier. Figures du bas à gauche et à droite : débit moyen du trafic routier pour le site d'étude CH (ligne violette) et de PM (ligne orange). Les 3 périodes d'enregistrement (P1, P2 et P3) sont séparées sur l'axe des abscisses par le symbole //.

► La matrice de corrélation entre le trafic routier et les indices acoustiques pour chaque enregistreur des deux vallées, classés selon leur distance à la route, se trouve dans l'archive *Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip* (site d'étude CH : *traficCorrelation_PM.png* ; site d'étude PM : *traficCorrelation_CH.png*). Les figures représentant l'évolution temporelle quotidienne des indices acoustiques pour chaque enregistreur et pour les périodes P1, P2 et P3 sont incluses dans le fichier d'archive (*dailyEvolution_XXYY.png* ; 36 figures ; XX correspond à CH ou PM et YY correspond au numéro de l'enregistreur ; 36 figures).

5.2.5.2 Evolution temporelle selon l'heure de la journée

Les résultats précédents mettent en évidence l'impact de la saison et de l'année sur le paysage sonore. De même, le paysage sonore varie de manière importante au cours de la journée.

La Figure 3 représente l'évolution de chacun des 8 indices écoacoustiques au cours d'une journée moyenne, sur la période P1 et pour chacun des habitats :

- Le NDSI, connu pour réagir à la biophonie, présente 2 pics : un vers 7h puis un autre vers 20h qui correspondent aux phénomènes du chorus matinal et du chorus du soir (périodes particulières en lien avec le lever et le coucher du soleil durant lesquelles les oiseaux chantent de manière intense).
- Le MED et le Leq_t augmentent au cours la journée, traduisant une augmentation des niveaux sonores, probablement due à l'activité humaine et peut être également à une propagation différente des sons en raison de la température qui est plus élevée en journée que la nuit.

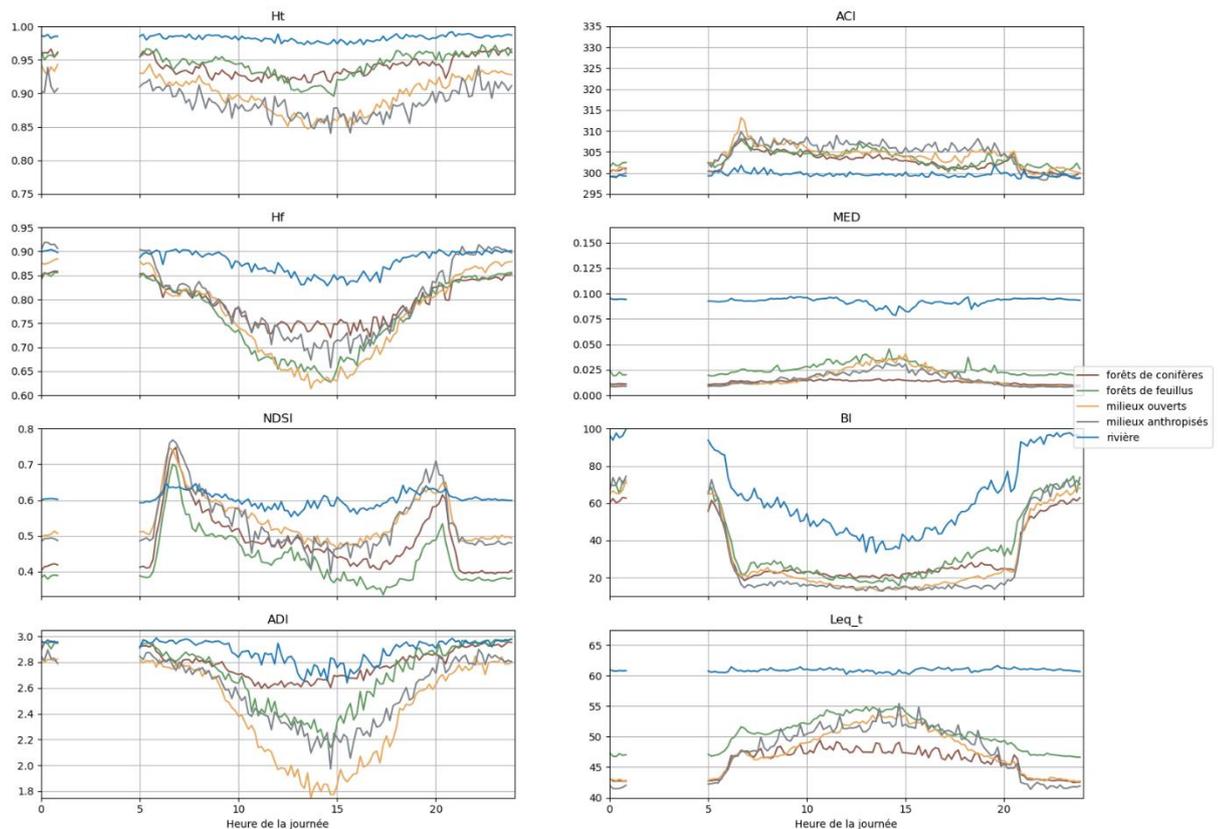


Figure 3 : Evolution temporelle des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI, Leq_t) selon l'heure de la journée. Chaque indice est moyenné sur l'ensemble des données de la période P1 pour tous les enregistreurs (sites Praz-sur-Arly/Megève et Chamonix confondus) de même habitat majoritaire (forêts de conifères, forêts de feuillus, milieux ouverts, milieux anthropisés, rivière), et représenté en fonction de l'heure de la journée (0h-24h).

La Figure 24 est l'analogue de la Figure 3 mais pour la journée moyenne de la période P2 (été). Pour la période P2, le motif de l'indice NDSI diffère fortement de celui représenté pour la période P1, probablement du fait de la quasi-absence du phénomène de chorus des oiseaux en été. En revanche, cet indice passe par un pic à la tombée de la nuit (vers 22h) puis décroît progressivement tout au long de la nuit : il pourrait s'agir des insectes stridulants nocturnes (sauterelles, grillons), actifs en été. Les criquets, plutôt diurnes et liés aux milieux ouverts pourraient expliquer le pic observable vers 17h dans la courbe des milieux ouverts, expliquant ainsi le creux d'activité vers 20h entre insectes diurnes et nocturnes. Par ailleurs, les indices relatifs au niveau sonore (MED et Leq_t) augmentent beaucoup plus en journée qu'à la période P1, traduisant probablement une activité humaine accrue en été en raison du tourisme.

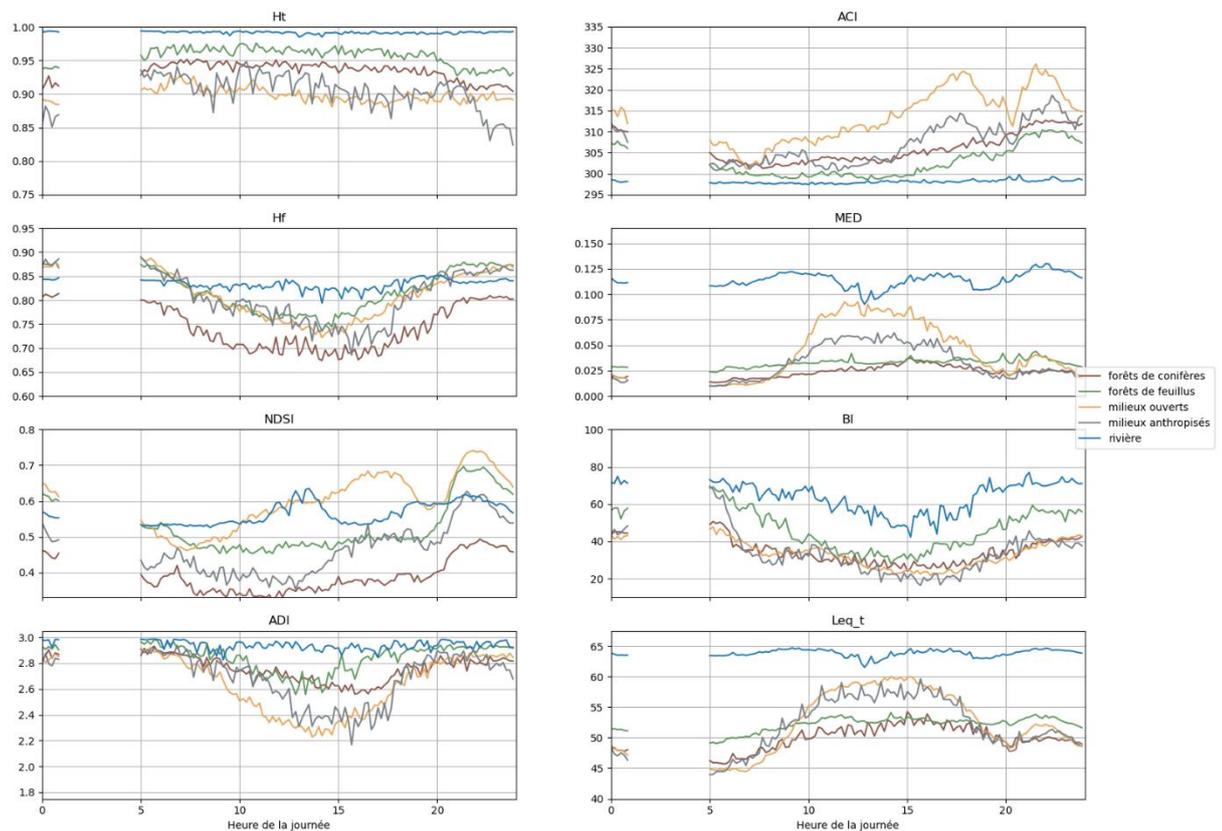


Figure 24 : Evolution temporelle des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI, Leq_t) selon l'heure de la journée. Chaque indice est moyenné sur l'ensemble des données de la période P2 pour tous les enregistreurs (sites PM et CH confondus) de même habitat majoritaire (forêts de conifères, forêts de feuillus, milieux ouverts, milieux anthropisés, rivière), et représenté en fonction de l'heure de la journée (0h-24h).

► Les figures représentant l'évolution temporelle des indices acoustiques au fil de journées moyennes pour les périodes P1 et P2 pour chacun des 36 positions d'enregistreur sont incluses dans le fichier d'archive *Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip* (période P1 : *averageDay_XXYY_P1.png* ; 36 figures – période P2 : *averageDay_XXYY_P2.png* ; 36 figures ; XX correspond à CH ou PM et YY correspond au numéro de la position d'enregistreur ; 36 figures).

A noter que, pour la plupart des indices, les variations temporelles semblent plus fortes à l'échelle de la journée qu'à l'échelle de la saison. Autrement dit, le paysage sonore varie en général de manière plus importante entre le matin et l'après-midi d'une même journée qu'entre le printemps et l'été à la même heure de la journée.

5.2.5.3 Double évolution temporelle : heure de la journée – jour de l'année

Enfin, la Figure permet de rendre compte de cette double échelle de variation temporelle (heure par heure et jour par jour) pour l'ensemble des enregistreurs de la vallée PM pour les périodes P1 et P2. Les phénomènes de chorus du matin et du soir apparaissent nettement sur l'indice NDSI pendant la période P1. De plus, on voit clairement qu'ils sont reliés au lever du soleil qui a lieu de plus en plus tôt, le pic émergeant vers 7h au 25/03 puis vers 6h au 22/04. Il en va de même pour le chorus du soir en lien avec le coucher du soleil. Les « lignes horizontales » qui apparaissent représentent des événements sonores durant entre quelques heures et quelques jours et correspondent (en partie) aux jours de pluie, comme vu précédemment.

La Figure est l'analogue de la Figure mais pour la vallée CH. Un avantage de ce type de représentation est qu'il permet de détecter des événements sonores singuliers, sous la forme d'un pixel de couleur très différente de la tendance globale. Ces événements ont lieu à un moment très précis et affectent la plupart des enregistrements en même temps. Par exemple, pour la vallée CH (Figure), le 22/04/2021, à 11h10, les indices acoustiques présentent des

valeurs très inhabituelles, en particulier : l'ADI demeure très faible subitement. Après écoute, il s'agit du passage d'un avion de chasse survolant la vallée.

La comparaison de ces représentations entre les deux vallées (Figure et Figure) permet également de souligner un autre aspect par lequel les deux vallées diffèrent : la présence d'une voie ferrée dans la vallée CH. Les patterns verticaux très réguliers, visibles notamment pour l'indice Leq_t, trahissent des événements sonores ayant lieu à heures fixes qui s'avèrent être des passages de trains après écoute des fichiers audio concernés. Cet effet est particulièrement visible sur la Figure qui présente le même type de représentation pour CH14, position d'enregistreur la plus proche de la voie ferrée.

En raison du sous-échantillonnage temporel (1 minute enregistrée toutes les 10 minutes) et de la vitesse de traversée de la zone d'étude par les trains, il est possible que ces sons ne soient pas captés par tous les enregistreurs. De plus, en raison de la régularité des horaires des trains, il est possible que d'autres trains passent systématiquement quand les enregistreurs sont éteints.

► Les figures représentant cette double évolution temporelle des indices acoustiques pour chacune des 36 positions d'enregistreurs sont incluses dans le fichier d'archive Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip (timeEvolution_XXYY_P1-P2.png ; XX correspond à CH ou PM et YY correspond au numéro de la position d'enregistreur ; 36 figures).

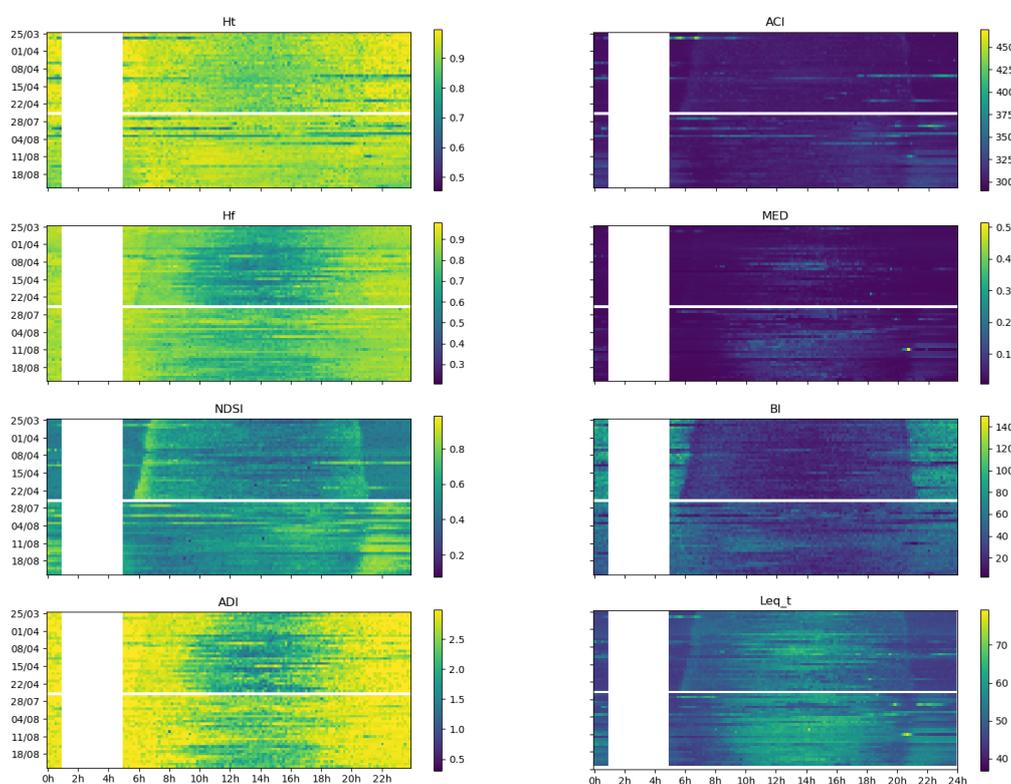


Figure 25 : Evolution temporelle des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI, Leq_t) selon l'heure de la journée et le jour de l'année pour les périodes P1 et P2 du site d'étude PM. La valeur de chaque indice est codée par une échelle de couleur en fonction de l'heure de la journée (axe des abscisses) et de la date d'enregistrement (axe des ordonnées). Les données des périodes P1 et P2 sont représentées sur la même cartographie en couleurs : elles sont séparées par une ligne horizontale blanche (P1 : partie supérieure de chaque cartographie en couleurs ; P2 : partie inférieure de chaque cartographie de couleurs).

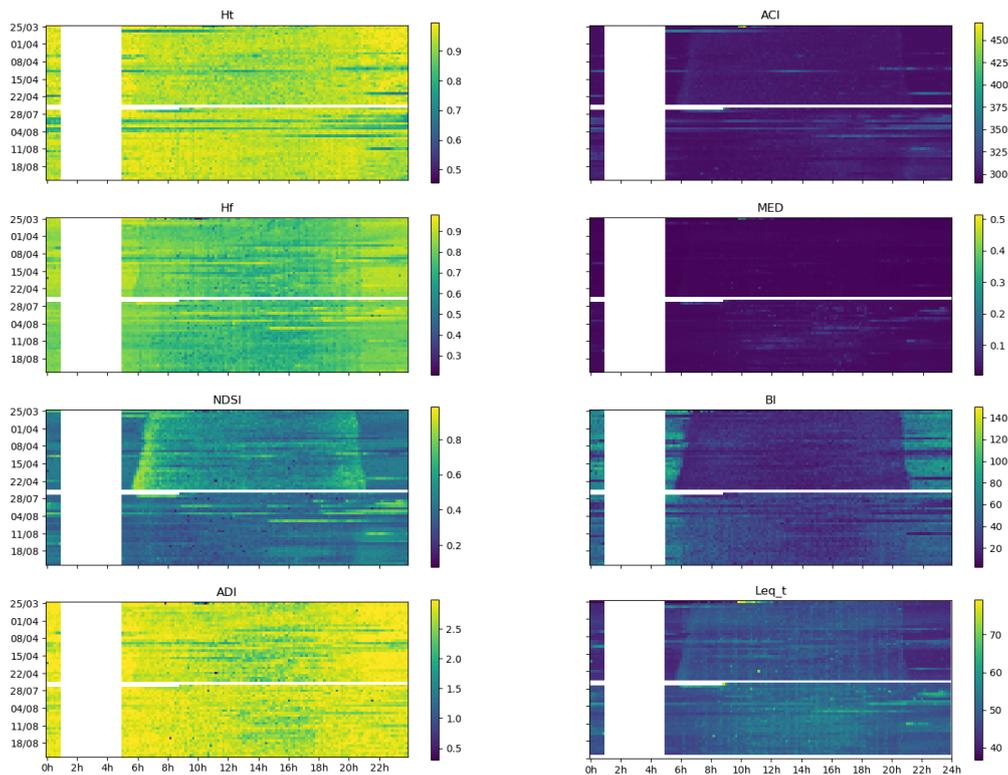


Figure 26 : Evolution temporelle des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI, Leq_t) selon l'heure de la journée et le jour de l'année pour les périodes P1 et P2 du site d'étude CH. La valeur de chaque indice est codée par une échelle de couleur en fonction de l'heure de la journée (axe des abscisses) et de la date d'enregistrement (axe des ordonnées). Les données des périodes P1 et P2 sont représentées sur la même cartographie en couleurs : elles sont séparées par une ligne horizontale blanche (P1 : partie supérieure de chaque cartographie en couleurs ; P2 : partie inférieure de chaque cartographie de couleurs).

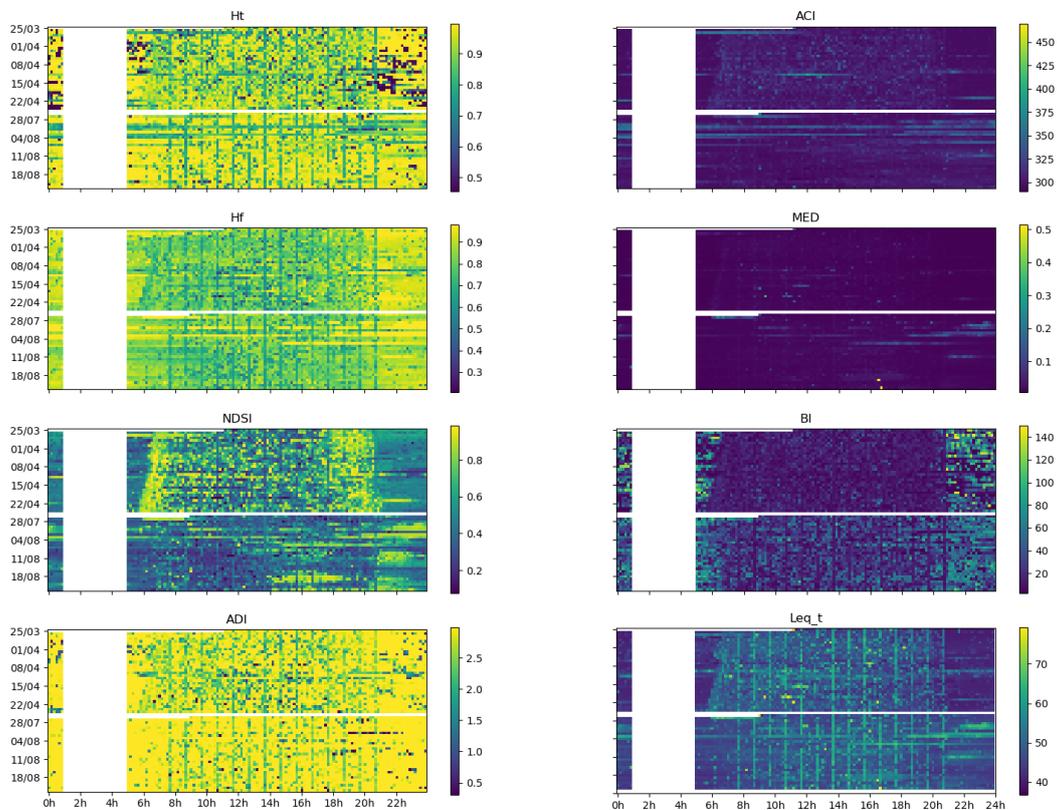


Figure 27 : Evolution temporelle des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI, Leq_t) selon l'heure de la journée et le jour de l'année pour les périodes P1 et P2 de l'enregistreur CH14. La valeur de chaque indice est codée par une échelle de couleur en fonction de l'heure de la journée (axe des abscisses) et de la date d'enregistrement (axe des ordonnées). Les données des périodes P1 et P2 sont représentées sur la même cartographie en couleurs : elles sont

séparées par une ligne horizontale blanche (P1 : partie supérieure de chaque cartographie en couleurs ; P2 : partie inférieure de chaque cartographie de couleurs).

5.2.6 Analyse de la connectivité structurelle acoustique

5.2.6.1 Effet de la distance à la route

La Figure 4 présente les valeurs moyennes des indices acoustiques sur la journée (9h-19h) pour chaque position d'enregistreur selon leur distance à la route principale de la vallée et avec une coloration selon le type d'habitat. Cette représentation a pour objectif de mettre en évidence l'impact éventuel du trafic routier sur les paysages sonores environnants.

Une tendance semble émerger, induisant une légère décroissance de Leq_t et de MED en fonction de la distance à la route. Ce faible effet semble impacter les indices principalement dans les 200-300 premiers mètres (à partir de la route), traduisant une diminution du niveau sonore induit par le trafic routier jusqu'à atteindre le niveau de bruit ambiant.



Figure 4 : Influence de la distance à la route : valeurs moyennes des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI, Leq_t) calculés sur l'ensemble des données des périodes P1 et P2 pour chaque enregistreur (sites d'études CH et PM) en fonction de la distance à la route (valeur absolue, abscisses). La couleur des points correspond à l'habitat majoritaire autour de la position de chaque enregistreur.

► Les figures d'effet de la distance sur les 8 indices acoustiques présentées pour chaque période d'enregistrement sont incluses dans le fichier d'archive Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip (roadDistance_P1.png, roadDistance_P2.png, roadDistance_P3.png, roadDistance_P3b.png).

5.2.6.2 Définition de la connectivité structurelle acoustique

A l'heure actuelle, la communauté scientifique n'a pas abouti à une définition de la connectivité structurelle dans le domaine du paysage sonore, notamment du fait de la relative nouveauté des méthodes d'écologie sonore. Aussi, nous proposons ici une définition en se basant sur le concept la connectivité structurelle telle que définie dans la trame verte et bleue. De la même façon que la connectivité structurelle entre deux zones adjacentes est caractérisée par des zones présentant les mêmes éléments paysagers, la connectivité structurelle acoustique pourrait être définie comme une invariance spatiale des éléments du paysage sonore. Dans cette étude, le

paysage sonore est décrit par 8 indices. L'étude de la stabilité spatiale de ces 8 indices (connectivité structurelle des indices) permet de qualifier cette connectivité structurelle acoustique.

5.2.6.3 Connectivité structurelle des indices

La Figure 9 et la

Figure 5, très similaires à la Figure 48, peuvent s'apparenter, pour chaque vallée étudiée, à une sorte de vue en coupe avec la route principale au centre et les deux versants de part et d'autre de celle-ci. Les indices sont, comme précédemment, des moyennes sur les jours (9h-19h, période durant laquelle la connectivité du paysage sonore est à priori la plus négativement impactée en raison de l'activité humaine) pour les périodes P1 et P2. On retrouve l'augmentation de MED et Leq_t aux abords de la route principale traduisant un certain degré de non-connectivité structurelle des paysages sonores (du point de vue de ces 2 indices) d'un versant à l'autre de la vallée.

► Les figures de connectivité structurelle des 8 indices pour les deux vallées et pour chaque période sont incluses dans le fichier d'archive Biodiov_Connect_BioPhonia_Figures.zip (site d'étude PM : *connectivity_PM_P1.png, connectivity_PM_P2.png, connectivity_PM_P3.png, connectivity_PM_P3b.png* ; site d'étude CH : *connectivity_CH_P1.png, connectivity_CH_P2.png, connectivity_CH_P3.png, connectivity_CH_P3b.png*).

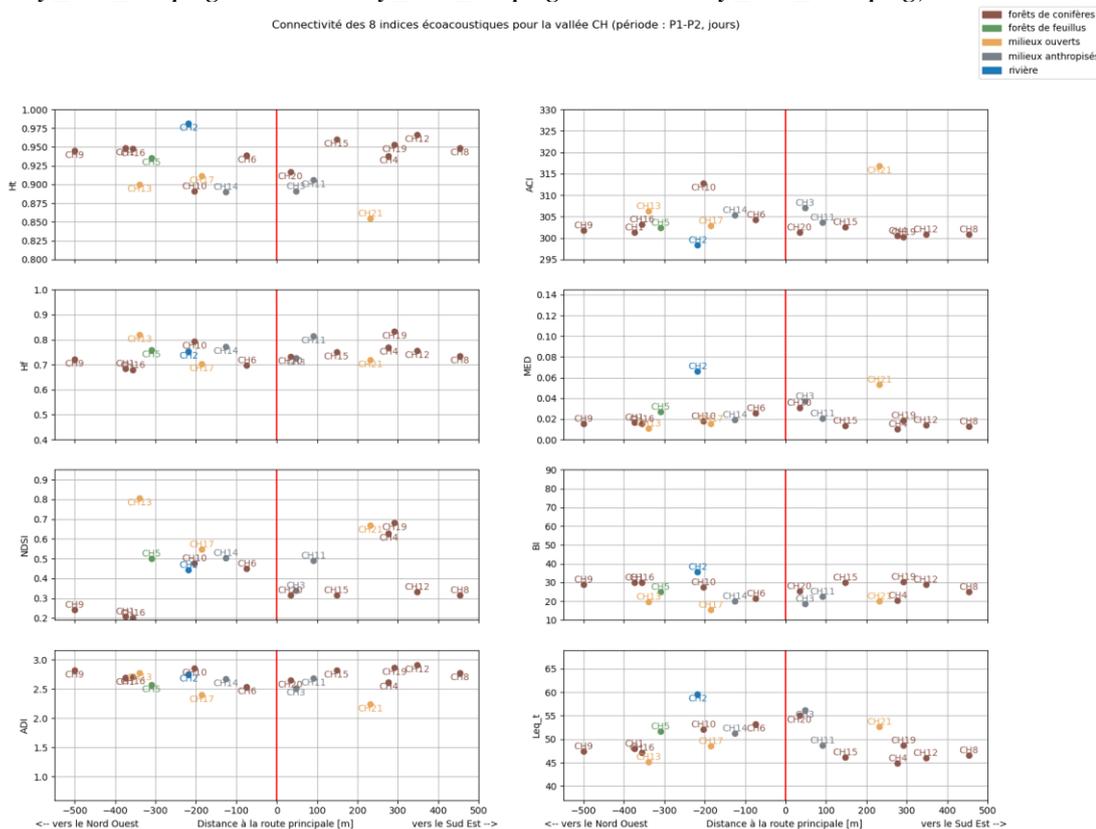


Figure 29 : Valeurs moyennes des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, BI, ADI, Leq_t) calculés sur l'ensemble des données des périodes P1 et P2 pour chaque enregistreur du site d'étude CH en fonction de la distance à la route (abscisses). La couleur des points correspond à l'habitat majoritaire autour de la position de chaque enregistreur. La barre verticale rouge représente la route. Les valeurs négatives de distances correspondent aux enregistreurs positionnés vers le Nord-Ouest, et les valeurs positives aux enregistreurs positionnés vers le Sud-Est.

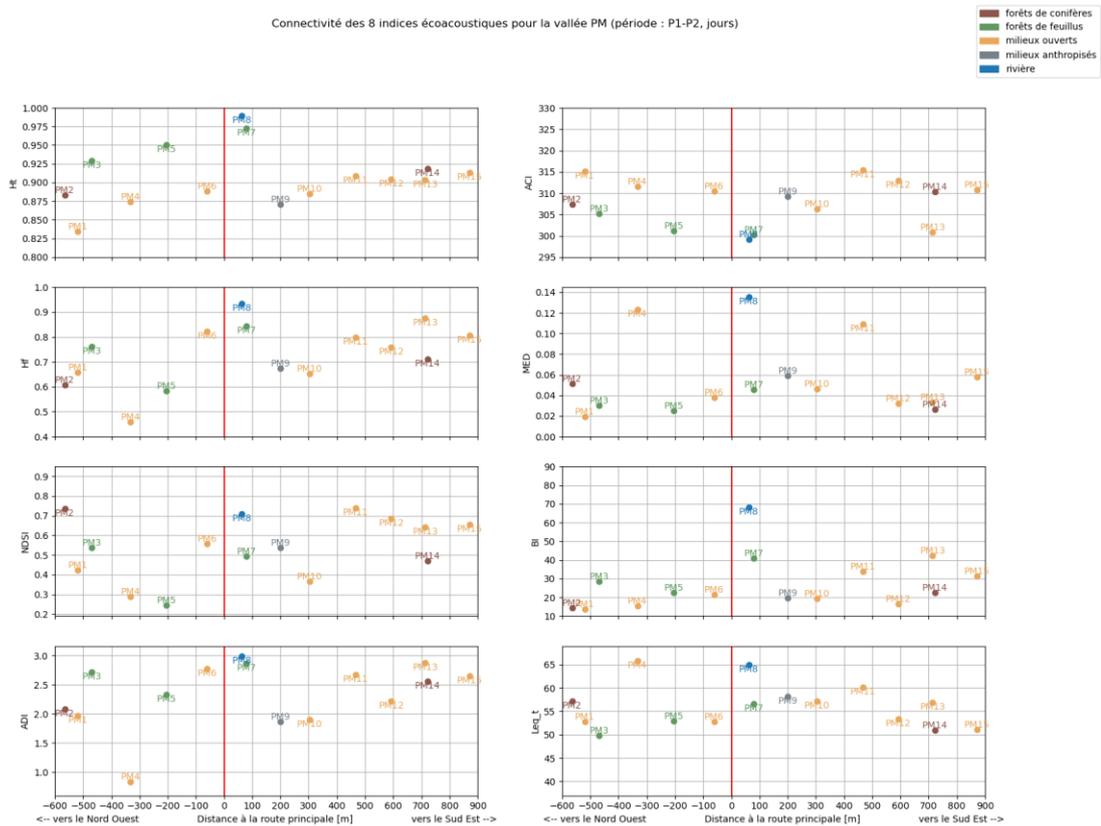


Figure 5 : Valeurs moyennes des 8 indices écoacoustiques (Ht, ACI, Hf, MED, NDSI, Bi, ADI, Leq_t) calculés sur l'ensemble des données des périodes P1 et P2 pour chaque enregistreur du site d'étude PM en fonction de la distance à la route (abscisses). La couleur des points correspond à l'habitat majoritaire autour de la position de chaque enregistreur. La barre verticale rouge représente la route. Les valeurs négatives de distances correspondent aux enregistreurs positionnés vers le Nord-Ouest, et les valeurs positives aux enregistreurs positionnés vers le Sud-Est.

L'étude des indices a permis de montrer la pertinence des indices écoacoustiques pour décrire quantitativement les paysages sonores afin de les comparer entre eux, temporellement, spatialement et en fonction d'autres variables telles que l'habitat, la météo, le trafic routier ou encore la distance à la route, élément central des corridors écologiques étudiés.

Les indices écoacoustiques considérés dans cette étude mettent en évidence de fortes disparités de paysage sonore entre les 36 positions d'enregistreurs étudiées, qui sont majoritairement liées à l'habitat autour de l'enregistreur plutôt qu'à la localisation de l'enregistreur au sein du corridor. Cependant, il existe des différences au sein d'une même catégorie d'habitat. L'approche « habitat majoritaire dans un rayon de 50m » pourrait probablement être affinée en intégrant une mosaïque d'habitat pondérée par la distance à l'enregistreur.

Par ailleurs, une évolution temporelle à deux échelles de temps a été mise en évidence. Premièrement, les indices écoacoustiques reflètent une variation des paysages sonores selon le jour de l'année. Les indices basés sur une estimation des niveaux sonores augmentent globalement avec l'été, en comparaison des valeurs recueillies au printemps. Une explication probable demeure l'augmentation de l'activité humaine, en particulier touristique, mais d'autres paramètres tels que l'effet de la météo sur la propagation acoustique ou les changements de biophonie sont à considérer. Deuxièmement et de façon encore plus marquée, les paysages sonores varient selon l'heure de la journée, en lien avec d'éventuelles variations de l'anthropophonie et de la biophonie. Par exemple, l'indice NDSI témoigne notamment de variations importantes : plus faible la nuit, période durant laquelle l'activité humaine est limitée. Par ailleurs, les variations de NDSI peut s'expliquer en partie par la présence du chorus matinal des oiseaux au printemps et aux stridulations d'insectes en été. Enfin, l'habitat autour de la

position d'un enregistreur et ses variations participent de concert à ces modifications de paysages sonores.

Enfin, pour chaque corridor écologique, la route principale, élément structurant du paysage et source d'une certaine fragmentation, semble avoir un faible effet sur les paysages sonores pour les enregistrements proches de la route dont les niveaux sonores sont légèrement plus élevés. La connectivité structurelle du paysage sonore est une notion qui n'est pas encore parfaitement définie au sein de la communauté scientifique mais cette étude permet d'approcher une première définition. La connectivité structurelle sonore pourrait correspondre à la similitude entre les paysages sonores de deux sites adjacents, impliquant une connectivité structurelle sonore forte lorsque les indices écoacoustiques calculés reflètent une invariance spatiale au sein de la zone échantillonnée.

Cette nouvelle approche et les résultats de cette étude marquent une avancée dans le domaine de l'écologie sonore, notamment en tentant de définir la notion de connectivité structurelle par le son. Le protocole conçu et déployé au cours de ce projet a démontré la pertinence de l'étude du paysage sonore et de l'utilisation des indices écoacoustiques dans le cadre d'un diagnostic appliqué aux corridors écologiques. Il semble nécessaire de poursuivre cette étude en l'élargissant à de nouvelles zones. On obtiendrait alors une gamme de degrés de connectivité structurelle acoustique qu'il serait pertinent de confronter ensuite à la connectivité d'un point de vue fonctionnel, c'est-à-dire en tenant compte du comportement, de la capacité de déplacement et de l'utilisation de l'espace de chaque espèce.

5.3 Bilan Global

5.3.1 Objectifs atteints

- Il est possible de suivre la distribution temporelle et spatiale des paysages acoustiques.
- L'UMAP donne de bonnes représentations et permet de visualiser les ressemblances acoustiques et leur évolution temporelle.
- On observe une signature acoustique des différents habitats, montrant une forte structuration des habitats dans les caractéristiques acoustiques des corridors et une faible connectivité structurelle entre les habitats.
- On observe que cette différence est plus marquée le matin et le soir lorsqu'il n'y a plus de contraintes anthropiques.
- La journée, les bruits anthropiques se font entendre sur l'ensemble des capteurs, masquant et homogénéisant tout le paysage sonore.
- On observe une forte pression des contraintes de l'anthropophonie dans les corridors.
- L'analyse des indices écoacoustiques suggère l'influence de plusieurs facteurs sur les paysages sonores :
 - Le moment de la journée (alternance jour/nuit, lever et coucher du soleil, etc.).
 - Le jour de l'année (influence de la saison et d'événements marqués).
 - L'habitat autour de chacun des enregistreurs.
 - La météorologie.
 - La distance à la route.
 - L'intensité du trafic routier.
- Les indices écoacoustiques permettent de définir une notion de connectivité structurelle pour les paysages sonores.

5.3.2 Limites et perspectives

Comment interpréter les UMAP ? L'UMAP est un algorithme de réduction de dimension basé sur des techniques d'apprentissage et de l'analyse de données topologiques. Il fournit un cadre très général pour aborder la réduction de dimension, mais peut fournir des réalisations concrètes spécifiques. Ainsi, si on fait tourner plusieurs fois les algorithmes de l'UMAP, la représentation peut légèrement varier. Il faut également faire attention à ce que les distances entre les clusters de l'UMAP ne soient pas directement liées à des distances acoustiques. Cependant, cette représentation montre visuellement à quel point les classes considérées sont séparables par rapport aux groupes de caractéristiques sélectionnées.

Pourquoi tous les corridors n'ont pas été calculés avec les UMAP ? A ce jour, un seul corridor a été analysé et pour une période, car les temps de calcul sont très conséquents, et le cluster de calcul ne peut traiter qu'une partie des données à la fois. Dans la prochaine étape, nous aurons une visualisation complète des sites et des périodes.

Mesure-t-on la connectivité structurelle ou fonctionnelle ? Dans cette analyse, nous traitons de la connectivité structurelle et non fonctionnelle. Nous avons analysé les similarités acoustiques des différents habitats et comment sont structurés spatialement et temporellement ces paysages acoustiques.

Les indices acoustiques ne permettent pas d'étudier la connectivité fonctionnelle qui nécessite de confronter à la connectivité structurelle plusieurs autres informations telles que le comportement, la capacité de déplacement et l'utilisation de l'espace de chaque espèce.

Les habitats ont-ils le même espace de détection que des signaux acoustiques ?
Utilisation de l'espace de détection dans les comptages : La réponse est non, en milieu ouvert les signaux se propagent mieux, l'espace de détection est plus important que dans la forêt. De plus, proche des habitations, le rapport signal/bruit est plus faible donc l'espace de détection est fortement réduit par les bruits anthropiques. A notre connaissance, aucun modèle ne prend en compte la réalité de la propagation acoustique dans le calcul de la surface d'écoute ou de la probabilité de détection. Par exemple, en utilisant le concept d'espace de détection pour les microphones des enregistreurs automatiques, il serait possible de préciser la surface couverte par chaque enregistreur selon le milieu et le bruit ambiant.

L'absence de statistique : une étude statistique poussée est requise afin de démontrer la significativité des corrélations observées entre les indices acoustiques et les facteurs étudiés (temps, habitat, météo, distance à la route, intensité du trafic routier).

6 Perspectives et projet futur

6.1 Prochaines actions

- 1) La première étape consistera à quantifier la connectivité en fonction de la propagation des signaux sonores et donc à attribuer une connectivité par signal et /ou par espèce. La mesure de l'activité vocale de quelques espèces cibles sur l'ensemble des enregistreurs d'un corridor nous permettra d'obtenir des cartes d'utilisation de l'espace par ces espèces, avec des potentielles ruptures de communication au sein des corridors induites par les bruits anthropiques. La temporalité pourra également être étudiée (jour-nuit, 2021, 2022).
- 2) En un deuxième temps, un indice global de connectivité fonctionnelle sera calculé incluant les modalités de propagation, le type d'habitat, les contraintes de bruit anthropique, ainsi que le pourcentage de couverture. Cette métrique nous permettra de comparer la connectivité entre les deux corridors et d'analyser leur dynamique spatiale et temporelle afin de savoir quand et où la connectivité fonctionnelle est la plus grande ou la plus faible.
- 3) Enfin, un temps sera consacré à la publication scientifique et la mise en place d'un protocole pour généraliser l'étude de la connectivité fonctionnelle de corridors écologiques identifiés par le SRCE (Schéma Régional de Cohérence Écologique).

6.2 Contribution aux programmes nationaux et à la trame blanche

La suite de ce projet entre dans le cadre de la mise en place du programme national de « surveillance de la biodiversité terrestre » porté par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) visant à mesurer, identifier et suivre l'influence des activités humaines sur la biodiversité et les pratiques les plus vertueuses à valoriser. A terme ce projet de recherche permettra d'analyser plus précisément l'impact sur la biodiversité terrestre dans l'anthropocène et caractériser les pressions directes ou indirectes qui ont des implications sur l'état et la dynamique de la biodiversité terrestre à l'échelle d'un territoire. La poursuite de ces travaux permettra ainsi :

i) la mise en évidence des liens entre pressions humaines et impacts sur la biodiversité : mesure de l'impact des contraintes anthropiques sur la connectivité des corridors.

ii) La caractérisation des couples pressions-impacts par la mise en place de nouveaux indices et protocoles utilisant de nouvelles technologies d'acoustique passive pour évaluer la connectivité et les pressions anthropiques dans les corridors.

iii) de proposer de nouvelles métriques d'évaluation de la fonctionnalité des corridors, et d'indicateurs des barrières acoustiques (bruits) anthropiques, avec une évaluation sur des territoires et une période définie à l'échelle de corridors.

En s'insérant dans la trame verte et bleu et la trame blanche, nos résultats permettront ainsi de contribuer pleinement à renforcer les actions de la société dans son ensemble pour enrayer le déclin de la biodiversité et favoriser un développement humain soutenable.

De plus ce projet interdisciplinaire est fortement structurant et repose sur une forte collaboration scientifique entre des laboratoires scientifiques (Laboratoire ENES, MNHM, IRD), des bureaux d'étude (Biophonia) et des gestionnaires de l'environnement (ASTER). Ce projet permettra de proposer de nouvelles alternatives, de nouvelles métriques et de nouveaux protocoles de suivis de ces corridors et de sa biodiversité, en lien avec l'utilisation, la gestion et la préservation du territoire par les différents acteurs locaux. Avec une dimension géographique régionale pour l'étude mais une portée scientifique nationale et internationale.

7 Bibliographie

- ALCOCER, I., LIMA, H., SUGAI, L.S.M. AND LLUSIA, D. (2022), Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis. *Biol Rev.* <https://doi.org/10.1111/brv.12890>
- BATES, A. J., SADLER, J. P., GRUNDY, D., LOWE, N., DAVIS, G., BAKER, D., YOUNG, H. (2014). Garden and Landscape-Scale Correlates of Moths of Differing Conservation Status: Significant Effects of Urbanization and Habitat Diversity. *PLoS ONE*, 9(1), e86925.
- BEIER, P., NOSS, R.F., (1998), Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology*, vol. 12, n° 6, p. 1241-1252.
- BENNETT, A.F., (2003), Linkages in the landscape. The role of corridors and connectivity in wildlife conservation, Gland, Switzerland et Cambridge, UK, IUCN, 254 p.
- BERGES, L., ROCHE, P., AVON, C. (2010), Corridors écologiques et conservation de la biodiversité, intérêts et limites pour la mise en place de la Trame Verte et Bleue, *Sciences Eaux & Territoires*, n° 3, p. 34-39,
- BRECKHEIMER, I., HADDAD, N. M., MORRIS, W. F., TRAINOR, A. M., FIELDS, W. R., JOBE, R. T., WALTERS, J. R. (2014). Defining and evaluating the umbrella species concept for conserving and restoring landscape connectivity. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 28(6), 1584–1593.
- GASC, A., SUEUR, J., PAVOINE, S., PELLENS, R., GRANDCOLAS, P. (2013). Biodiversity Sampling Using a Global Acoustic Approach: Contrasting Sites with Microendemism in New Caledonia. *PLoS One* 8,e65311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065311>
- MCKINNEY, M. L. (2002). Urbanization, Biodiversity, and Conservation The impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems. *BioScience*, 52(10), 883–890.
- OPDAM, P., VAN APELDOORN, R., SCHOTMAN, A., & KALKHOVEN, J. (1993). Population responses to landscape fragmentation. In C. C. Vos & P. Opdam (Eds.), *Landscape Ecology of a Stressed Environment* (pp. 147–171). Springer Netherlands.
- PIERETTI, N., FARINA, A., MORRI, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecol. Indic.* 11, 868–873. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2010.11.005>
- PIERIK, M. E., DELL'ACQUA, M., CONFALONIERI, R., BOCCHI, S., & GOMARASCA, S. (2016). Designing ecological corridors in a fragmented landscape: A fuzzy approach to circuit connectivity analysis. *Ecological indicators*, 67, 807-820.
- PIMM S. L., RUSSELL G. J., GITTLEMAN J. L., BROOKS T. M. (1995). The future of biodiversity. *Science* 269, 347–350. [10.1126/science.269.5222.347](https://doi.org/10.1126/science.269.5222.347)
- PIMM S., RAVEN P., PETERSON A., ŞEKERCIOĞLU Ç. H., EHRLICH P. R. (2006). Human impacts on the rates of recent, present, and future bird extinctions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103, 10941–10946. [10.1073/pnas.0604181103](https://doi.org/10.1073/pnas.0604181103)
- SETHI SS, JONES NS, FULCHER BD, PICINALI L, CLINK DJ, KLINCK H, ORME CDL, WREGG PH, EWERS RM (2020) Characterizing soundscapes across diverse ecosystems using a universal acoustic feature set. *Proc Natl Acad Sci USA* 117:17049–17055
- SUEUR, J., PAVOINE, S., HAMERLYNCK, O., DUVAIL, S. (2008). Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal. *PLoS One* 3, e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>
- WARREN, P.S., KATTI, K., ERMANN, M., & BRAZEL, A. (2006) Urban bioacoustics: it's not just noise. *Animal Behaviour*, Volume 71, Issue 3, Pages 491-502,