

Rapport de stage 2^{ème} année – M2-IEGB

1^{er} mars – 31 août 2017

Aznar Mélanie

Les indices de diversité acoustique : Test d'un nouvel outil pour estimer l'effectif des meutes de loups gris

CROC (Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores)

4 rue de la Banie, 57590 Lucy

Germain Estelle, CROC, directrice

Pichenot Julian, BEC, ingénieur d'études

Directeurs de stage



Association des étudiants du Master IEGB

Table des matières

1. Introduction.....	1
1.1. Contexte de l'étude	1
1.2. État de l'art et problématique	2
1.3. Programme et réalisations.....	5
2. Matériels et méthodes	6
2.1. Données acoustiques.....	6
2.2. Choix et paramétrage des indices de diversité acoustique de type α	6
2.3. Analyse de la corrélation entre les valeurs d'indices α et la taille des chorus.....	7
2.4. Test de l'effet de différents biais sur les valeurs d'indices α	7
2.4.1. Biais 1 : effet de la durée du chorus par rapport à la durée de l'enregistrement..	7
2.4.2. Biais 2 : effet du bruit ambiant et de son niveau d'amplitude.....	8
2.4.3. Biais 3 : effet du recouvrement temporel entre les hurlements des individus composant le chorus.....	8
2.5. Tests préliminaires sur des chorus naturels	9
3. Résultats.....	10
3.1. Corrélation entre les valeurs d'indices α et la taille des chorus.....	10
3.2. Effets de différents biais sur les indices α	10
3.2.1. Biais 1 : effet de la durée du chorus par rapport à la durée de l'enregistrement	10
3.2.2. Biais 2 : effet du bruit ambiant et de son niveau d'amplitude.....	11
3.2.3. Biais 3 : effet du recouvrement temporel entre les hurlements des individus composant le chorus.....	12
3.3. Tests préliminaires sur des chorus naturels	12
4. Discussion	14
5. Conclusion	18
Bibliographie et Webographie.....	
Annexes	

Table des Figures

Figure 1 : Chorus de loups gris d'Europe au Parc Animalier de Sainte Croix en Moselle (© CROC / PAPIN M. 2016).	
Figure 2 : Dispositif d'enregistrement audio et vidéo des chorus (© CROC 2014).	
Figure 3 : Démarche de création des chorus pour le biais 1.....	
Figure 4 : Enregistreur autonome de type SM3 élaboré par Wildlife Acoustics (© CROC 2015)	
.....	
Figure 5 : Démarche de création des chorus pour le biais 2.....	
Figure 6 : Démarche de création des chorus pour le biais 3.....	
Figure 7 : Valeurs moyennes et écart-types des indices par nombre de loups composant le chorus.	
Figure 8 : Boîtes à moustache des valeurs des indices en fonction de T0 et des 4 traitements du biais 1.	
Figure 9 : Boîtes à moustache des valeurs d'indices en fonction de T0 et des 3 traitements du biais 2..	
Figure 10 : Boîtes à moustache des valeurs d'indices en fonction des 3 traitements du biais 3 (superposition des hurlements dans le chorus).....	
Figure 11: Prédiction du nombre de loups pour 5 valeurs d'indices calculés sur des chorus naturels	

Table des Tableaux

Tableau 1 : Description des indices α testés dans cette étude et des paramétrages associés.	
Tableau 2 : Résultats des tests de corrélation entre les valeurs d'indices moyens et le nombre de loups composant les chorus. La nature du test est précisée dans le tableau.	
Tableau 3 : Résultats du test de Wilcoxon et de Friedman pour les biais 1 à 3.	

Table des Annexes

Annexe 1 : Diagramme de Gantt présentant le programme de réalisation de ce stage.

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des individus composant les chœurs artificiels (modifié à partir de Papin 2014).....

Annexe 3 : Démarche de constitution des chœurs artificiels de Papin (2014), exemple de la série 1.....

Remerciements

Tout d'abord, je remercie les partenaires financiers de la thèse CIFRE de Morgane PAPIN, dans laquelle s'est intégré mon travail de stage : l'Union européenne dans le cadre du Programme Opérationnel FEDER-FSE Lorraine et Massif des Vosges 2014-2020, la DREAL Grand Est, la Région Grand Est, l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, le Zoo d'Amnéville et le Parc Animalier de Sainte Croix. Mes remerciements s'adressent aussi au Commissariat à l'Aménagement du Massif des Vosges et à la Fondation Le PAL Nature pour leur soutien financier au CROC.

Je remercie sincèrement le CROC de m'avoir donné la possibilité de réaliser ce stage très enrichissant sur une thématique qui m'intéresse depuis quelques années maintenant.

Je tiens à remercier chaleureusement Estelle GERMAIN pour son encadrement sans faille tout au long de mon stage, pour les nombreuses relectures de mon travail et tous ses conseils. Ensuite, je tiens à remercier Julian PICHENOT, lui aussi pour son encadrement, ses conseils concernant mes analyses et son aide dans la réalisation de certains graphiques. Sans oublier Morgane PAPIN, qui a été là pour répondre à toutes mes petites questions quotidiennes, relire mon travail, me conseiller, m'encourager et elle aussi encadrer mon travail, qui j'espère lui sera utile. Merci pour les heures passées toutes les deux à programmer des boucles sous R.

Merci à Arnaud MARTIN pour son encadrement en tant que tuteur de stage universitaire.

Je remercie aussi Anaïs CHARBONNEL, chargée d'études scientifiques au CROC, pour son soutien, ses conseils, que ce soit pour mon stage ou ma future vie professionnelle.

Un grand merci à Amandine GASC, qui a eu la gentillesse de prendre le temps de répondre très précisément à mes questions concernant le paramétrage de l'indice ACI.

Enfin, je remercie mes parents et Maël pour leurs soutiens tout au long de mon stage et leurs nombreuses relectures de mon rapport.

Mélanie



1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

Basé à Lucy en Lorraine, le Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores (CROC) est une association de droit local créée en 2010. Cette structure a deux activités principales : la recherche scientifique en écologie appliquée et la diffusion des connaissances d'une part, la sensibilisation et l'éducation à l'environnement d'autre part. Les programmes de recherche de cette structure portent actuellement sur le Loup gris (*Canis lupus*) et le Lynx boréal (*Lynx lynx*). Ces deux carnivores sont présents dans le Massif des Vosges (ONCFS 2016a, b). Le loup y est quant à lui revenu naturellement en 2011 et fait depuis lors l'objet de suivis mis en œuvre par le Réseau Loup Lynx de l'ONCFS¹ notamment (Leonard *et al.* 2012). Au niveau européen, le Loup gris figure dans la Directive Habitat Faune Flore (annexes 2, 4 et 5) et dans la Convention de Washington / CITES (annexe 2). Au niveau national, il figure sur la liste rouge des espèces menacées où il est classé comme vulnérable (UICN France *et al.* 2009). Il figure également sur la liste des espèces protégées (arrêté du 15 septembre 2012 modifiant celui du 23 avril 2007). Depuis 2013, le loup fait également l'objet d'un 3^{ème} Plan National d'Action (MEDDE & MAAF 2013). Ce PNA préconise notamment la mise en place de protocoles de suivi des meutes présentes sur le territoire comme celui des « hurlements provoqués » (Longis *et al.* 2004, Sèbe *et al.* 2004). L'objectif principal de ce protocole est de détecter la présence de meutes et les épisodes de reproduction à partir des hurlements entendus (Longis *et al.* 2004).

En 2012, le CROC a pris part aux sessions de hurlements provoqués organisées par l'ONCFS dans les Hautes-Vosges. À cette occasion, des hurlements de loups ont été enregistrés (CROC 2014). En 2013, de nouvelles sessions de hurlements provoqués ont été organisées, permettant au CROC de faire des essais préliminaires sur l'usage des enregistreurs autonomes (SM2+, Wildlife Acoustics) pour la détection du Loup gris. À cette occasion, un chorus de loups a été enregistré (CROC 2015). Ces deux premières expériences de terrain ont conduit le CROC à mettre en place un programme visant à développer l'outil acoustique pour le suivi du Loup gris. C'est ainsi que M. Papin a intégré le CROC pour la réalisation de son stage de M2 portant sur l'estimation de l'effectif des meutes grâce à leurs hurlements (Papin 2014). À l'issue de ce stage, une thèse CIFRE en bioacoustique a débuté au CROC en 2015 (jusqu'en 2018) dans le cadre d'une collaboration avec le BEC² et le LIEC³ (CNRS, UMR 7360) de l'Université de

¹ Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage

² Biologiste Écologue Consultant

³ Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux

Lorraine. Les axes de recherche développés sur les hurlements des loups se décomposent en 3 thématiques : « détection et localisation des meutes », « estimation de l'effectif des meutes » et « détection des événements de reproduction ». C'est dans le second axe de recherche de cette thèse que s'intègre mon stage « *Les indices de diversité acoustique : Test d'un nouvel outil pour estimer l'effectif des meutes de loups gris* ». Mon travail est réalisé en étroite collaboration avec la doctorante. Les résultats seront repris et intégrés à son manuscrit de thèse et feront l'objet d'une publication scientifique.

Ce stage est encadré par E. Germain, directrice du CROC et co-directrice de la thèse, et J. Pichenot, ingénieur d'études au BEC et co-directeur de la thèse également. J'ai à ma disposition tout le matériel informatique nécessaire pour la bonne conduite des missions qui me sont confiées. Les données utilisées (chorus artificiels) pour les analyses statistiques sont celles issues de Papin (2014). Les moyens financiers sont ceux de la thèse (voir la liste des partenaires financiers dans les remerciements).

Cette étude vise à détourner l'utilisation actuellement faite des indices de diversité acoustique (développés initialement afin d'évaluer la biodiversité ; Gasc 2012) pour estimer l'effectif des meutes de loups gris grâce à leurs hurlements. La méthode s'appuiera sur la mesure de l'hétérogénéité acoustique en testant l'hypothèse de l'existence d'une corrélation positive entre l'indice acoustique et le nombre de loups hurlant dans un chorus (Papin 2014). Il s'agit d'une approche innovante qui propose la création d'un nouvel outil de suivi acoustique des meutes.

1.2. État de l'art et problématique

La bioacoustique - science de l'étude des communications acoustiques animales - est une discipline en plein essor. Elle est notamment utilisée pour le suivi des espèces animales dont les signaux acoustiques permettent de les déterminer, d'identifier les individus (via le principe de la signature vocale) et d'étudier les dynamiques de leurs populations (Sèbe 2012).

Grâce aux récentes avancées technologiques, le matériel acoustique s'est amélioré et les méthodes d'analyses se sont également développées (Sueur *et al.* 2014). Ces avancées ont incité la création et l'émergence de la méthode acoustique '*Rapid Acoustic Survey*' (RAS ; Sueur *et al.* 2008b) qui complète la méthode '*Rapid Biodiversity Assessment*' (RBA) avec l'outil acoustique (Gasc 2012). La RBA consiste à réaliser des inventaires exhaustifs sans identifier précisément les espèces. Elle permet une estimation globale et rapide de la biodiversité (Gasc 2012). La RAS est finalement une méthode RBA non-taxonomique puisqu'elle se base sur des

critères acoustiques plutôt que taxonomiques (Sueur *et al.* 2012). C'est une méta-méthode puisqu'elle utilise la communauté comme unité de mesure (Sueur *et al.* 2012).

L'hypothèse initiale de la méthode RAS est que chez les espèces émettant des sons, l'hétérogénéité acoustique fréquentielle ou temporelle peut refléter des différences de richesse spécifique (Sueur *et al.* 2008b, Obrist *et al.* 2010). Deux types d'indices ont été développés dans cette perspective : l'indice d'entropie acoustique H et l'indice de dissimilarité acoustique D (Sueur *et al.* 2008b). L'indice d'entropie acoustique H est fondé sur l'entropie spectrale H_f et l'entropie temporelle H_t . Il mesure la diversité acoustique à l'intérieur d'une communauté et s'appuie donc sur le principe de diversité α (Sueur *et al.* 2008b). L'indice de dissimilarité acoustique D est quant à lui fondé sur la dissimilarité spectrale D_f et temporelle D_t . Il permet d'estimer la dissimilarité acoustique entre deux communautés via le nombre d'espèces non partagées et s'appuie sur le principe de diversité β (Sueur *et al.* 2008b). Afin d'être calibrés, ces deux indices ont dans un premier temps été testés sur des chorus artificiels composés d'oiseaux, d'amphibiens et d'insectes (Sueur *et al.* 2008b). Cette approche permet en effet de contrôler l'ensemble des paramètres composant le chorus (composition, intensité, répétition). Par la suite, H et D ont été testés sur des enregistrements réalisés en milieu naturel à l'aide d'enregistreurs autonomes (forêts tanzaniennes ; Sueur *et al.* 2008b). L'ensemble de ces études (chorus artificiels ou enregistrements naturels) ont ainsi montré que H est positivement corrélé avec le nombre d'espèces présentes dans une communauté tandis que D est négativement corrélé avec le nombre d'espèces partagées par deux communautés. Récemment, Sueur *et al.* (2014) ont répertorié 18 indices acoustiques de type α et 4 indices acoustiques de type β développés par d'autres auteurs (*e.g.* Pieretti *et al.* 2011, Depraetere *et al.* 2012, Gasc *et al.* 2013).

Au regard de ces éléments, il apparaît que les indices α pourraient être détournés de leur usage actuel (évaluer la richesse spécifique d'une communauté) pour estimer l'effectif de groupes d'individus d'espèces discrètes, difficiles à suivre dans leur milieu naturel et qui utilisent un type de communication acoustique. C'est dans ce contexte que nous avons choisi de les tester sur le Loup gris (*Canis lupus*) dont les hurlements permettent la communication entre individus d'une même meute ou entre meutes différentes (Harrington & Asa 2003). Jusqu'à présent, des études acoustiques menées en captivité ont montré que les loups pouvaient être identifiés et suivis grâce à leurs hurlements et, plus précisément, leur signature vocale individuelle (Tooze *et al.* 1990, Palacios *et al.* 2007, Root-Gutteridge *et al.* 2014a, Papin 2014). D'autres recherches ont exploré la possibilité d'identifier les événements de reproduction (Longis *et al.* 2004, Sèbe *et al.* 2004, Palacios *et al.* 2016) mais aussi de dénombrer les loups à partir de leurs hurlements

(Filibeck *et al.* 1982, Harrington 1989, Longis *et al.* 2004, Sèbe *et al.* 2004, Zaccaroni *et al.* 2012, Papin 2014, Passilongo *et al.* 2015).

Plusieurs travaux se sont focalisés sur l'étude de la signature vocale individuelle pour le dénombrement des loups (*e.g.* Tooze *et al.* 1990, Root-Gutteridge *et al.* 2014b). Cependant, les analyses associées à cette méthode peuvent s'avérer laborieuses et chronophages voire source d'erreur. En effet, la quantité importante d'étapes nécessaires à la mesure de certains paramètres peut avoir pour conséquence un cumul d'erreurs minimales prises individuellement mais pouvant conduire à un biais important lorsqu'elles sont ajoutées (Papin 2014). Ainsi, notre approche utilisant la notion d'hétérogénéité acoustique via le calcul d'indices, pourrait permettre de limiter ou contourner ces risques d'erreurs. En effet, le calcul des indices α consiste à étudier les chorus et non les hurlements individuels qui les composent.

Parmi les indices de diversité α , on retrouve ceux d'intensité (Rychtáriková & Vermeir 2013), de complexité (Boelman *et al.* 2007, Villanueva-Rivera *et al.* 2007, Sueur *et al.* 2008b, Joo *et al.* 2011, Pieretti *et al.* 2011, Depraetere *et al.* 2012, Gasc *et al.* 2013, Pekin *et al.* 2012, Towsey *et al.* 2014) et pour finir ceux du paysage sonore (Joo *et al.* 2011, Krause *et al.* 2011, Kasten *et al.* 2012). Les indices de complexité sont les plus nombreux (Sueur *et al.* 2014) et constituent une bonne piste à explorer pour une première application des indices α à l'estimation des effectifs de loups dans les chorus. Parmi ces indices de complexité, on retrouve notamment l'indice H (Sueur *et al.* 2008b), l'indice AR ('Acoustic Richness' ; Depraetere *et al.* 2012), l'indice ACI ('Acoustic Complexity Index' ; Pieretti *et al.* 2011) et l'indice NP ('Number of Peaks' ; Gasc *et al.* 2013). AR se compose des indices H_t et M ('Median of amplitude envelope'). Il a été créé dans le but d'étudier la diversité de communautés d'oiseaux provenant de milieux différents (Depraetere *et al.* 2012). L'indice ACI quant à lui, estime l'abondance des vocalisations d'oiseaux dans un enregistrement et ce, en identifiant les variations d'intensité acoustique associables à une activité animale (Pieretti *et al.* 2011). Enfin, l'indice NP mesure la complexité spectrale via la détection de pics de fréquences (Gasc *et al.* 2013). Il a été créé afin de remédier à la sensibilité du bruit ambiant observée avec H_f (Depraetere *et al.* 2012).

Dans ce contexte, le but de la présente étude est de tester des indices de diversité acoustique de type α sur des chorus de loups gris afin de développer une nouvelle méthode d'estimation de l'effectif des meutes. Dans un premier temps, sept indices acoustiques (H , H_f , H_t , M , AR , ACI , NP) ont été testés sur des chorus artificiels créés par Papin (2014). Ensuite, l'effet de trois biais (durée du chorus par rapport à la durée de l'enregistrement, niveau d'amplitude du bruit ambiant, importance des recouvrements temporels) sur les réponses de ces indices a été évalué

en s'inspirant des récents travaux de Gasc *et al.* (2013). En effet, pour que les indices soient utilisables pour le dénombrement des loups, ceux-ci ne doivent varier qu'en fonction du nombre d'individus composant le chorus et ne pas être influencés par d'autres paramètres. Les trois biais testés ont été adaptés à partir des travaux de Gasc *et al.* (2015). Enfin, une application préliminaire des indices les plus pertinents a été réalisée sur des chorus naturels aux effectifs connus.

1.3. Programme et réalisations

Les enregistrements de loups gris utilisés dans cette étude ont été effectués en parcs animaliers en 2014 à l'occasion d'un stage de Master 2 (voir Papin 2014). À partir de ces enregistrements, Papin (2014) a procédé à des extractions de hurlements individuels pour ensuite créer les chorus artificiels qui ont servi de base à mon travail. J'ai par ailleurs réutilisé ces extractions pour créer de nouveaux chorus artificiels pour l'étude des biais pouvant influencer les indices. Dans le cadre de mon stage au CROC, ma première mission a été de réaliser un tour d'horizon bibliographique sur les indices de diversité acoustique existant dans la littérature scientifique. Suite à cette synthèse, certains indices ont été sélectionnés à l'issue de réunions de travail permettant d'obtenir la validation de mes encadrants. Les réunions de travail organisées ont aussi été l'occasion de choisir d'évaluer la sensibilité de ces indices face à divers biais pouvant créer de l'hétérogénéité acoustique non due au changement de l'effectif des loups dans les chorus. À l'issue de cette première étape, ma seconde mission a été de tester les indices sélectionnés. Pour cela, j'ai dans un premier temps utilisé les chorus artificiels dont le nombre d'individus qui les composaient était connu. Après avoir calculé les indices, l'effet de différents biais a été testé afin d'évaluer leur influence sur les valeurs des indices, le but étant de sélectionner l'indice le plus fiable pour l'estimation du nombre d'individus composant un chorus. Pour terminer, les indices qui se sont avérés les plus robustes statistiquement ont été appliqués à des chorus naturels, non modifiés et donc plus proches de ce qui peut être obtenu en conditions réelles.

L'ensemble de ce travail est restitué dans le présent rapport pour l'évaluation de mon stage de Master 2. Par la suite, mon travail sera repris par M. Papin afin d'être intégré dans son manuscrit de thèse et fera l'objet d'une publication scientifique à laquelle je serai associée. Le calendrier retraçant les principales étapes d'avancement fixées avec mes encadrants et les échéances importantes est présenté en Annexe 1.



Figure 1 : Chorus de loups gris d'Europe au Parc Animalier de Sainte Croix en Moselle (© CROC / PAPIN M. 2016).



Figure 2 : Dispositif d'enregistrement audio et vidéo des chœurs (© CROC 2014).

2. Matériels et méthodes

2.1. Données acoustiques

Les données acoustiques utilisées dans cette étude sont celles de Papin (2014). Les hurlements ont été obtenus à partir de chorus de loups gris (*Canis lupus*) enregistrés en captivité dans deux parcs animaliers en France : 10 loups au Parc Animalier de Sainte Croix en Moselle (Figure 1) et deux loups au Zoo de Pescheray dans la Sarthe (voir Papin 2014 ; Annexe 2).

Les enregistrements ont été effectués à une faible distance loups-micro (15 à 25 mètres) et dans des conditions météorologiques optimales (sans pluie ni vent) permettant d'obtenir des chorus de bonne qualité audio (Papin 2014). Un enregistreur ZOOM H4n (fréquence d'échantillonnage : 44100 Hz, résolution d'amplitude : 16 bits) connecté à un microphone à condensateur Rode NTG-3 (directivité : super-cardioïde, réponse en fréquence : 40 – 20000 Hz ; Figure 2) a été utilisé. En parallèle de ces données audio, les chorus ont été filmés afin de pouvoir associer à posteriori chaque hurlement à un individu (Figure 2). Une fois les enregistrements audio et vidéos synchronisés, les chorus ont été examinés via le logiciel SONY SpectraLayers Pro 2.0 (2013) afin d'en extraire (format .wav) les vocalisations de type « hurlement » uniquement (Papin 2014).

Ensuite, des chorus artificiels composés de un à 12 individus ont été créés avec le logiciel Audacity (version 2.1.3, 2013) via une sélection aléatoire des individus et de leurs extractions (Papin 2014). Ainsi 10 séries de 1 solo artificiel et 10 séries de 11 chorus artificiels ont été obtenues, soit un total de 10 solos artificiels et 110 chorus artificiels d'une durée de 30 secondes chacun (Papin 2014 ; Annexe 3). La fréquence d'échantillonnage de chaque chorus a par la suite été fixée à 8000 Hz afin de se focaliser sur la bande fréquentielle propre aux hurlements de loups (150 – 1000 Hz ; Theberge & Falls 1967, Passilongo *et al.* 2010). En effet, d'après la limite de Nyquist, pour avoir une restitution du signal d'une qualité suffisante, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois supérieure aux fréquences maximales des signaux acoustiques étudiés (Barataud & Tupinier 2015). Le choix de cette fréquence permet ainsi d'obtenir une meilleure résolution du spectrogramme mais aussi de calculer plus rapidement les enveloppes et spectres moyens utilisés par la suite pour le calcul des indices.

2.2. Choix et paramétrage des indices de diversité acoustique de type α

Sept indices acoustiques ont été sélectionnés parmi ceux existant dans la littérature : l'entropie fréquentielle H_f , l'entropie temporelle H_t , l'entropie acoustique H , la médiane de l'enveloppe

Tableau 1 : Description des indices α testés dans cette étude et des paramétrages associés.

Indices	Description
<i>Hf</i>	<i>Hf</i> est calculé à partir du spectre moyen normalisé. Il a pour but d'analyser la complexité du signal sur sa composante spectrale. Sa valeur est comprise entre 0 (faible diversité en fréquence) et 1 (forte diversité fréquentielle ; Sueur <i>et al.</i> 2008).
<i>Ht</i>	Son calcul se base sur la complexité de l'enveloppe temporelle du signal. <i>Ht</i> est compris entre 0 et 1 grâce à une normalisation des valeurs de l'enveloppe (Sueur <i>et al.</i> 2008).
<i>H</i>	<i>H</i> peut être considéré comme un « super indice » puisqu'il est le produit des indices <i>Hf</i> et <i>Ht</i> . La valeur de celui-ci est également comprise entre 0 et 1. Plus la valeur est proche de 1, plus le son étudié est diversifié en fréquence et en amplitude (Sueur <i>et al.</i> 2008).
<i>M</i>	<i>M</i> se base sur la complexité temporelle en étudiant les valeurs normalisées de la médiane de l'enveloppe d'intensité des signaux. Il est compris entre 0 (activité acoustique faible) et 1 (activité acoustique élevée ; Depraetere <i>et al.</i> 2012).
<i>AR</i>	<i>AR</i> est également un « super indice » puisqu'il se calcule en utilisant le rang des valeurs des indices <i>M</i> et <i>Ht</i> . Sa valeur est comprise entre 0 (richesse acoustique faible) et 1 (richesse acoustique élevée ; Depraetere <i>et al.</i> 2012).
<i>ACI</i>	<p>L'<i>ACI</i>, développé par Farina et Morri (2008), mesure la complexité du spectrogramme sur des composantes temporelle et spectrale. Sa valeur augmente avec la variabilité temporelle du son en se basant sur le principe que les variations d'intensité sont associables à une activité acoustique d'origine animale et non anthropique. En effet, l'intensité des sons anthropiques varie peu dans le temps (Pieretti <i>et al.</i> 2011).</p> <p>Cet indice a la possibilité d'être calculé sur la durée totale du fichier ou sur plusieurs morceaux de durée identique dont la somme des <i>ACI</i> par morceaux donnera la valeur finale de l'indice. L'argument « nbwindows » de la fonction « <i>ACI</i> » sous « seewave » permet de définir le nombre de découpes désirées. La valeur choisie pour cet argument a été paramétrée à 234, ce qui correspond à une découpe de fichier de 0.128 s (30 s / 234, correspond à <i>j</i> dans la formule de l'indice).</p> <p>Pour le test du biais 1, l'argument « nbwindows » a été fixé à 936 pour les traitements T1 à T4 afin d'avoir des morceaux de fichiers d'une durée similaire pour l'ensemble des traitements (soit $j = 0.128$ s). Pour le test du biais 3, le paramètre « nbwindows » a été fixé à 1.</p>
<i>NP</i>	<p><i>NP</i> mesure la complexité spectrale via la détection de pics de fréquence (Gasc <i>et al.</i> 2013). Pour les enregistrements réalisés en milieu naturel, cet indice a pour avantage d'être peu sensible au bruit ambiant puisque son spectre moyen ne présente pas de pics majeurs.</p> <p>Quatre arguments programmables dans la fonction <i>NP</i> (« fpeaks » sous « seewave ») permettent de sélectionner les pics fréquents détectés : « nmax » (nombre maximal de pics), « amp » (valeur de la pente d'amplitude avant et après le pic), « freq » (distance minimale entre deux pics successifs) et « threshold » (seuil d'amplitude minimal). Pour cette étude, certains de ces arguments ont été paramétrés de la manière suivante : « freq = 15 Hz » et « threshold = 0.02 ».</p> <p>En effet, d'après Filibeck <i>et al.</i> (1982), la fréquence fondamentale des hurlements de loups participant simultanément à un chorus diffère toujours d'au moins 15 Hz et leur étude du spectre de fréquence s'est basée sur la gamme comprise entre 0 et 2000 Hz.</p> <p>Après que les pics aient été détectés et sélectionnés par la fonction, nous avons cherché à déterminer de manière manuelle, les différentes fréquences fondamentales accompagnées de leurs harmoniques. En effet, les fréquences des harmoniques sont une suite de multiples entiers de la fréquence fondamentale (Filibeck <i>et al.</i> 1982). Ce post-traitement avait pour but d'associer chaque suite de multiples entiers à un loup, le nombre de suites correspondant ainsi au nombre de loups participant au chorus.</p>

d'intensité M , la richesse acoustique AR , la complexité acoustique ACI et le nombre de pics fréquentiels NP . Un descriptif détaillé de ces indices et de leur paramétrage est présenté dans le Tableau 1. Le choix s'est porté sur des indices de type α , actuellement utilisés pour l'estimation de la richesse spécifique d'une communauté, qui pourraient donc être déclinés à une échelle plus fine pour l'estimation du nombre d'individus d'un groupe, ici les loups d'un chorus. L'ensemble de ces indices a été appliqué aux 120 chorus artificiels créés à l'aide du logiciel RStudio (version 1.0.153, 2017) et du package « seewave » (Sueur *et al.* 2008a).

2.3. Analyse de la corrélation entre les valeurs d'indices α et la taille des chorus

À partir de l'ensemble des valeurs d'indices obtenues pour les 120 chorus, les valeurs moyennes et écarts-types ont été calculés pour chaque indice par effectif de chorus.

Afin d'évaluer la force de la relation entre les indices calculés et le nombre d'individus composant les chorus, un test de corrélation de Pearson a été réalisé lorsque les conditions d'application étaient respectées (binormalité, homoscedasticité et indépendance des données ; Legendre *et al.* 1984). Dans le cas contraire, un test de Spearman a été employé.

2.4. Test de l'effet de différents biais sur les valeurs d'indices α

Seuls les indices α qui se sont avérés être les plus robustes statistiquement pour le dénombrement des loups dans les chorus (partie 2.3.) ont été utilisés pour tester l'effet de différents biais. Au total, ce sont trois différentes sources d'hétérogénéité acoustique, non liées aux loups, qui ont été testées sur les valeurs d'indices obtenues pour les chorus.

2.4.1. Biais 1 : effet de la durée du chorus par rapport à la durée de l'enregistrement

Le rapport entre la durée du signal d'intérêt (dans notre cas, le chorus de loups) et la durée totale de l'enregistrement (un enregistrement plus long réalisé en nature par exemple) peut avoir un effet sur certains indices α (*e.g.* Gasc *et al.* 2015). Pour tester ce biais, les indices ont été à nouveau calculés à partir de fichiers d'une durée de 120 s. Les nouvelles valeurs obtenues ont été comparées aux valeurs d'indices obtenues initialement à partir des chorus de 30 s (valeurs étalon). Les fichiers audio de 120 s ont été construits en ajoutant du silence et/ou du bruit ambiant aux 120 chorus originaux de 30 s de Papin (2014) selon des traitements décrits dans la Figure 3. Pour le traitement T1, 90 s de silence ont été ajoutées aux chorus de 30 s alors qu'en T4 il s'agissait de 90 s de bruit ambiant. Pour T2, 30 s de bruit ambiant et 60 s de silence ont

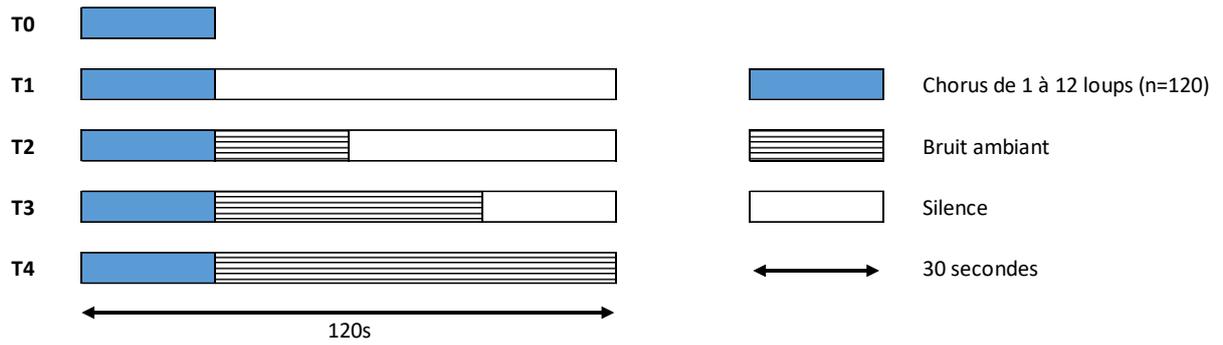


Figure 3 : Démarche de création des chorus pour le biais 1. T0 correspond aux chorus originaux de Papin (2014), T1 à T4 correspondent aux 4 traitements appliqués aux chorus originaux.



Figure 4 : Enregistreur autonome de type SM3 élaboré par Wildlife Acoustics (© CROC 2015)

été ajoutées aux chorus, et inversement pour T3. Au total, ce sont 480 nouveaux chorus artificiels qui ont été créés (T1 à T4). Dans la construction originale de ce biais, Gasc *et al.* (2014) considèrent T1 comme valeur de référence à laquelle comparer l'augmentation du rapport entre la durée de l'enregistrement et la durée du chorus. Toutefois, une autre question a été abordée en comparant les chorus étalons de 30 s (T0) aux chorus prolongés de 90 s de silence (T1), ceci dans le but d'évaluer l'impact de l'ajout de silence (diminution du temps du signal par rapport à celui de l'enregistrement).

Dans un premier temps l'existence d'une éventuelle différence entre les indices obtenus pour les traitements T0 et T1 a été étudiée à l'aide d'un test de Wilcoxon pour échantillons appariés. Puis un test de Friedman a été réalisé pour chacun des indices afin d'étudier l'effet des traitements T1 à T4.

Le bruit ambiant provient d'un enregistrement réalisé par le CROC en 2016 dans un parc animalier avec un enregistreur autonome de type SM3 (Wildlife Acoustics, Figure 4). Il s'agit d'une ambiance sonore matinale composée de chants d'oiseaux de milieu forestier.

2.4.2. Biais 2 : effet du bruit ambiant et de son niveau d'amplitude

Tester ce biais permet d'évaluer l'effet de l'évolution du rapport signal/bruit ambiant sur les indices (Gasc *et al.* 2015). Il permet d'identifier le ou les indices les moins sensibles au bruit ambiant afin ensuite, de sélectionner l'indice en fonction du contexte dans lequel l'enregistrement du chorus aura été réalisé. Pour cela, de nouveaux chorus ont été créés à partir des 120 chorus de 30 s de Papin (2014). Aux chorus originaux (T0), a été superposé un bruit ambiant de 30 s (identique à celui du biais 1) dont l'amplitude différait selon 3 traitements différents (normale, x 50 et x 100 ; voir Figure 5). Au total, ce sont 360 nouveaux chorus artificiels qui ont été créés (T1 à T3) à l'aide d'une boucle sous RStudio, pour être comparés aux valeurs d'indices étalon (T0).

Pour ce biais, un test de Friedman a été réalisé afin d'étudier l'effet des traitements.

2.4.3. Biais 3 : effet du recouvrement temporel entre les hurlements des individus composant le chorus

Pour que les indices testés puissent être utilisés pour dénombrer les loups participant à un chorus, leurs valeurs ne doivent pas être sensibles au degré de chevauchement des hurlements des individus composant un chorus (*e.g.* Gasc *et al.* 2015). L'objectif du biais 3 est donc d'évaluer l'effet de la répartition temporelle des hurlements au sein du chorus.

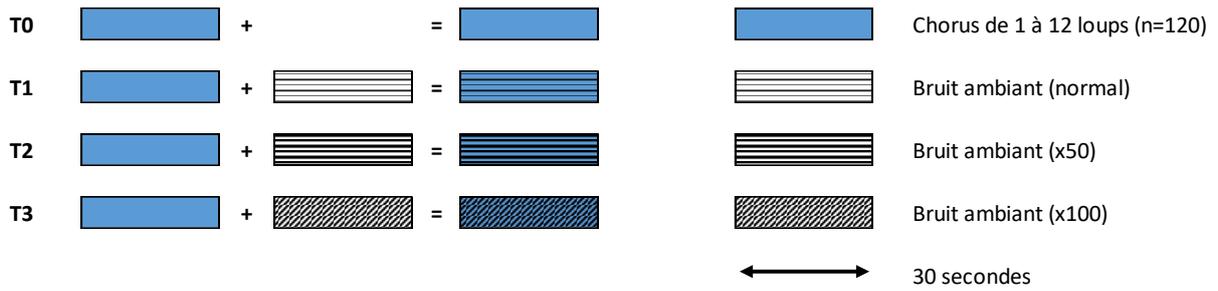


Figure 5 : Démarche de création des chorus pour le biais 2. T0 correspond aux chorus originaux de Papin (2014), T1 à T3 correspondent aux 3 traitements appliqués aux chorus originaux.

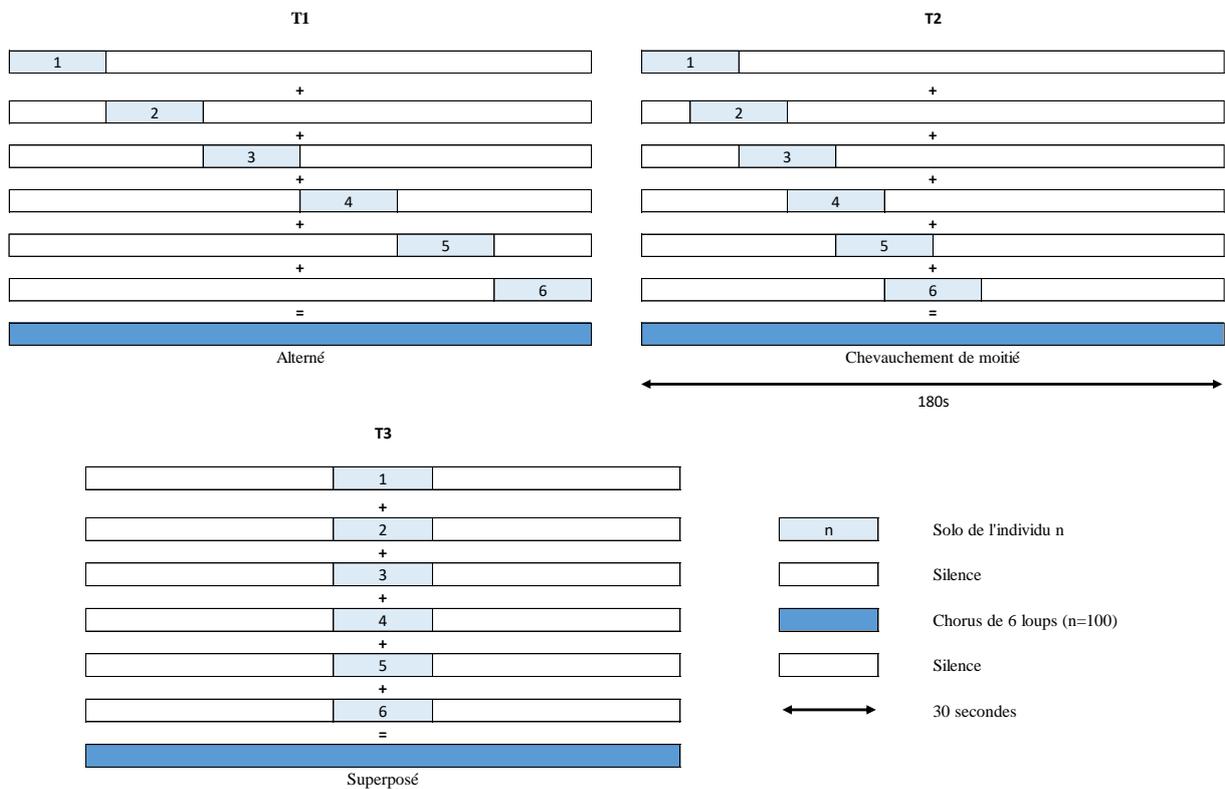


Figure 6 : Démarche de création des chorus pour le biais 3. T1 à T3 correspondent aux 3 traitements appliqués aux 100 compositions de six solos sélectionnés de manière aléatoire avec remise chez six loups afin d'obtenir les 300 nouveaux chorus.

La réalisation de ce test a, dans un premier temps, nécessité la création des nouveaux chorus sur lesquels différents traitements ont été appliqués. Au total, 100 chorus, basés sur les solos artificiels de six loups ont été créés en suivant les deux étapes suivantes :

- (1) sélection aléatoire de six loups parmi les 12 individus disponibles (Papin 2014) ;
- (2) pour ces six loups, sélection aléatoire d'un solo artificiel par individu ;

Ensuite, pour chacun des 100 chorus créés, trois décalages temporels ont été appliqués entre les six solos artificiels afin de constituer les nouveaux chorus (voir Figure 6). Ces trois traitements ont alors permis d'obtenir 300 nouveaux chorus (100 compositions x 3 traitements) de 180 secondes chacun pour lesquels les indices α ont été calculés. L'ensemble de cette démarche de création de nouveaux chorus a été réalisée à l'aide d'une boucle sous RStudio.

Un test de Friedman a été effectué pour étudier l'effet des traitements.

2.5. Tests préliminaires sur des chorus naturels

Les indices α qui se sont avérés être les plus robustes statistiquement pour le dénombrement des loups dans les chorus (partie 2.3.) ont été appliqués à des chorus « naturels » (c'est-à-dire non modifiés), enregistrés et filmés par Papin (2014) au Parc animalier de Sainte Croix (Moselle, France). Au total, cinq chorus dont le nombre d'individus est connu, ont été testés : deux chorus de trois individus et trois chorus de six individus. Ceux-ci intègrent par défaut un bruit ambiant et n'ont subi aucun traitement acoustique en dehors d'un sous-échantillonnage de leur fréquence à 8000 Hz pour les rendre comparables aux chorus artificiels. Le but de ce test est de savoir si les chorus artificiels de Papin (2014) peuvent être utilisés pour prédire le nombre d'individus dans des chorus naturels.

Une régression du nombre de loups en fonction des valeurs d'indices obtenues sur les 120 chorus artificiels de Papin (2014), a été réalisée pour chacun des indices. Une méthode de « régression locale », couramment abrégée « LOESS » ou « LOWESS » pour « LOcally WEighted Scatter-plot Smoother » (Cleveland *et al.* 1988) a été utilisée. Cette méthode peut être appliquée sous RStudio avec plusieurs packages qui utilisent la fonction « loess », conçue par B.D. Ripley sur la base des travaux de Cleveland *et al.* (1992). Ce type de régression utilise plusieurs modèles pour ajuster localement la courbe de régression au nuage de points. La méthode est robuste vis-à-vis des « outliers » et a également une bonne performance sur les valeurs limites. En contrepartie, elle ne permet pas d'obtenir une équation pour la courbe de régression obtenue. Ainsi, les valeurs obtenues pour les chorus naturels ont été confrontées à ces régressions non linéaires afin d'évaluer la potentialité des chorus artificiels à servir d'étalon.

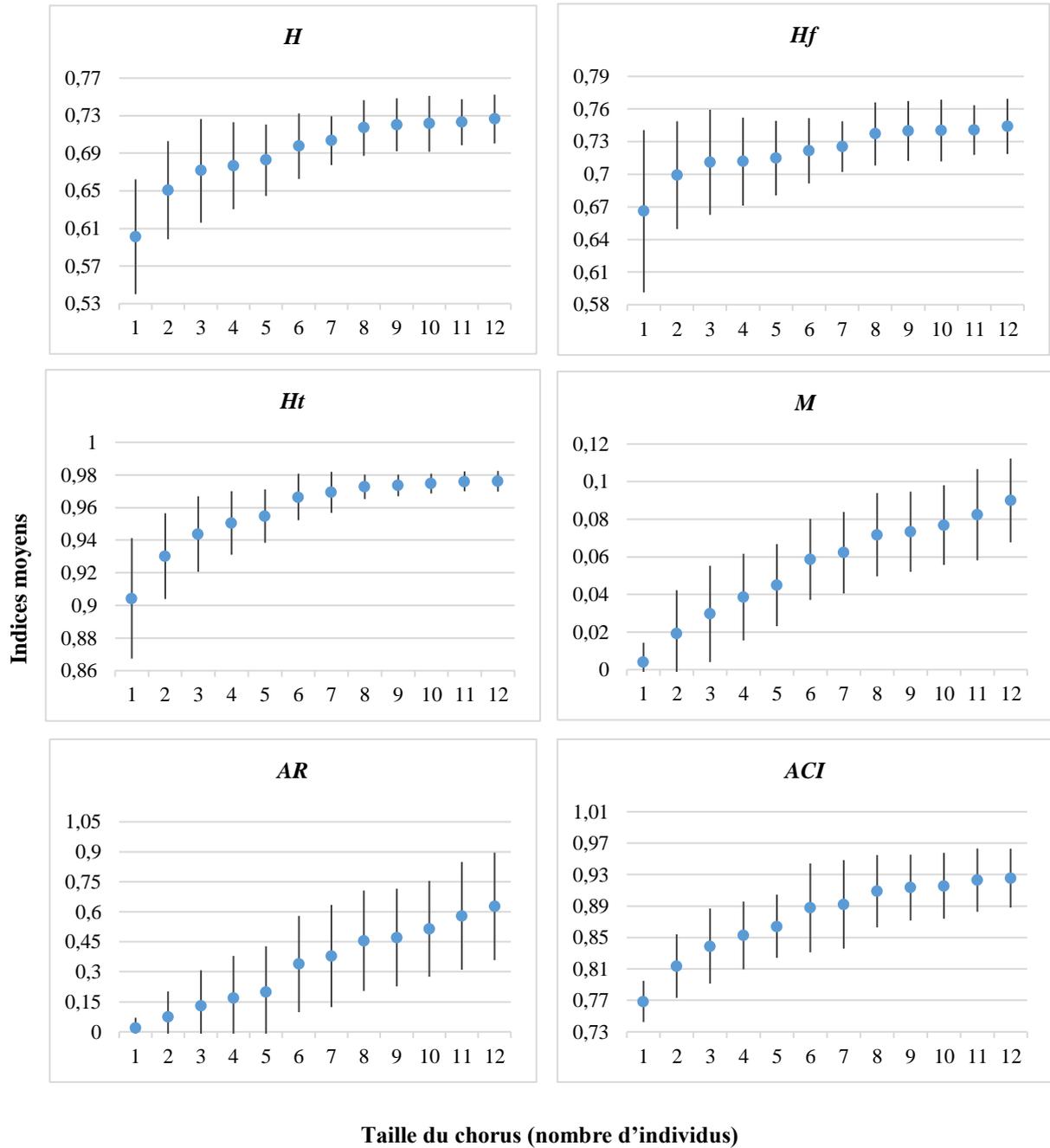


Figure 7 : Valeurs moyennes et écart-types des indices par nombre de loups composant les chorus.

3. Résultats

3.1. Corrélation entre les valeurs d'indices α et la taille des chorus

Pour chacun des 120 chorus, tous les indices ont pu être utilisés pour établir des corrélations avec le nombre de loups, excepté l'indice *NP*. En effet, ce dernier fournit un certain nombre de pics selon le paramétrage de sélection choisi. Cependant, il n'a pas été possible de dégager une relation claire entre ce nombre de pics et les différents harmoniques attribuables aux individus du chorus (plusieurs pics par individu compte tenu des harmoniques). Ainsi, la corrélation n'a pu être établie pour *NP*.

Finalement, les valeurs moyennes de l'indice *H* vont de 0.59 ± 0.06^4 à 0.73 ± 0.03 , celles de *Hf* oscillent entre 0.65 ± 0.08 et 0.74 ± 0.03 et celles de *Ht* sont comprises entre 0.91 ± 0.04 et 0.98 ± 0.01 . Pour *M*, l'indice moyen va de 0.005 ± 0.01 pour le plus faible effectif à 0.09 ± 0.02 pour le nombre maximum d'individus, pour *AR* de 0.03 ± 0.06 à 0.65 ± 0.30 et enfin pour *ACI* de 0.79 ± 0.03 à 0.95 ± 0.04 . Pour chaque indice, une corrélation positive apparaît entre la valeur de l'indice et le nombre de loups hurlant dans les chorus (Figure 7). Toutefois, les écarts-types montrent une étendue importante des valeurs d'indices à l'intérieur de chaque classe d'effectif, et certains (*Ht* notamment) diminuent quand le nombre d'individus augmente. Les indices *H*, *Ht*, *Hf* et *ACI* présentent un plateau aux environs de 8 ou 9 individus.

La corrélation de Spearman obtenue entre *H*, *Ht*, *Hf* et *ACI* et le nombre de loups composant les chorus est très forte ($\rho = 1$, $p < 2.20e-16$; Tableau 2). Il en est de même pour la corrélation de Pearson pour *M* et *AR* ($\text{cor} = 0.98$, $p = 1.60e-08$ et $\text{cor} = 0.99$, $p = 1.05e-10$ respectivement).

3.2. Effets de différents biais sur les indices α

Parmi les indices testés, seul l'indice *NP* n'a pas abouti à des résultats concluants pour l'estimation du nombre de loups composant un chorus. Aussi, l'effet des biais n'a pas été testé sur cet indice.

3.2.1. Biais 1 : effet de la durée du chorus par rapport à la durée de l'enregistrement

Pour chacun des indices, les valeurs obtenues ont été représentées en fonction des quatre traitements sur la Figure 8 (boîtes à moustache). Il apparaît que la modification de la durée de

⁴ écart-type

Tableau 2 : Résultats des tests de corrélation entre les valeurs d'indices moyens et le nombre de loups composant les chorus. La nature du test est précisée dans le tableau.

	Test de Pearson	Test de Spearman
<i>H</i>	-	rho = 1 ; p-value < 2.20e-16
<i>Hf</i>	-	rho = 1 ; p-value < 2.20e-16
<i>Ht</i>	-	rho = 1 ; p-value < 2.20e-16
<i>M</i>	cor = 0.98 ; p-value = 1.60e-08	-
<i>AR</i>	cor = 0.99 ; p-value = 1.05e-10	-
<i>ACI</i>	-	rho = 1 ; p-value < 2.20e-16

Tableau 3 : Résultats du test de Wilcoxon et de Friedman pour les biais 1 à 3. **Biais 1 :** comparaison T0-T1 via un test de Wilcoxon, T1-T4 test de Friedman ; **Biais 2 :** T0-T3 test de Friedman ; **Biais 3 :** T1-T3 test de Friedman, df : degree of freedom = degrés de liberté.

Biais 1				
	T0-T1		T1-T4 df = 4	
	V	p-value	chi-squared	p-value
<i>H</i>	6952	< 2.2e-16	360	< 2.2e-16
<i>Hf</i>	0		360	
<i>Ht</i>	7259		360	
<i>M</i>	7215		360	
<i>AR</i>	3752.5	0.41	12.95	0.005
<i>ACI</i>	4	< 2.2e-16	179.83	< 2.2e-16

Biais 2		
	T0-T3 df = 3	
	chi-squared	p-value
<i>H</i>	323.31	< 2.2e-16
<i>Hf</i>	287.04	
<i>Ht</i>	341.47	
<i>M</i>	360	
<i>AR</i>	360	
<i>ACI</i>	226.71	

Biais 3		
	T1-T3 df = 2	
	chi-squared	p-value
<i>H</i>	196.08	< 2.2e-16
<i>Hf</i>	72.96	
<i>Ht</i>	200	
<i>M</i>	188.24	
<i>AR</i>	0.34	0.84
<i>ACI</i>	34.61	3.06e-08

l'enregistrement par l'ajout de silence et/ou de bruit ambiant influence plus ou moins fortement les indices.

Une différence significative est mise en évidence entre les traitements T0 et T1 pour tous les indices ($p < 2.2e-16$; Tableau 3), à l'exception d'*AR* ($p = 0.41$). Les indices *Ht*, *M* et *ACI* sont plus fortement influencés par l'ajout de silence seul que les indices *H* et *Hf* (Figure 8). L'étendue des données pour *H*, *Hf*, *Ht* et *AR* reste similaire entre ces deux traitements, ce qui peut s'expliquer par le fait que le calcul de ces indices ne se base pas sur la composante temporelle du signal acoustique contrairement à *M* et *ACI*. Ces derniers sont donc plus sensibles à l'allongement de la longueur du fichier audio entre T0 et T1 (30 s à 120 s). Cette sensibilité à l'ajout de silence en plus du chorus, diminue de manière importante l'étendue des données entre T0 et T1.

De plus, il existe un effet significatif des traitements T1, T2, T3 et T4 (Tableau 3 ; $p < 2.2e-16$ pour *H*, *Hf*, *Ht*, *M* et *ACI* ; $p = 0.005$ pour *AR*). La différence entre T1 et T2 est très importante pour *H*, *Hf*, *Ht* et *M* (Figure 8). Pour les traitements T2 à T4, au cours desquels le ratio entre la durée du signal d'intérêt (ici le chorus) et la durée du bruit ambiant diminue, les valeurs des indices *H*, *Hf*, *Ht* et *M* ont tendance à augmenter avec le bruit ambiant. Cette augmentation est similaire entre ces 4 indices. *AR* présente quant à lui une tendance inverse avec une très légère diminution de sa valeur avec l'augmentation de la proportion de bruit ambiant. Enfin, pour *ACI* la tendance entre les traitements T1 à T4 est plus difficile à visualiser sur le graphique mais une différence significative entre ces traitements existe également. Toutefois, l'étendue des valeurs de cet indice reste constante contrairement à celles d'*H*, *Hf*, *Ht* et *AR* qui a tendance à diminuer avec l'augmentation de la proportion de bruit ambiant.

Pour conclure, l'indice *AR* est le moins influencé par ce biais puisqu'il est l'indice présentant le moins de différences entre les cinq traitements. L'indice *ACI* quant à lui, est peu influencé par l'augmentation de la proportion de bruit ambiant par rapport à la proportion du signal d'intérêt.

3.2.2. Biais 2 : effet du bruit ambiant et de son niveau d'amplitude

Il existe une différence entre les traitements (Tableau 3) : tous les indices sont influencés par l'ajout de bruit ambiant et par l'augmentation de l'intensité de celui-ci ($p < 2.2e-16$).

La Figure 9 représente des boîtes à moustache des valeurs d'indices obtenues pour les 120 chorus pour l'étalon et chacun des 3 traitements. Avec l'ajout d'un bruit ambiant d'intensité normale (T1) aux chorus originaux (T0), les valeurs de tous les indices, excepté pour *ACI*,

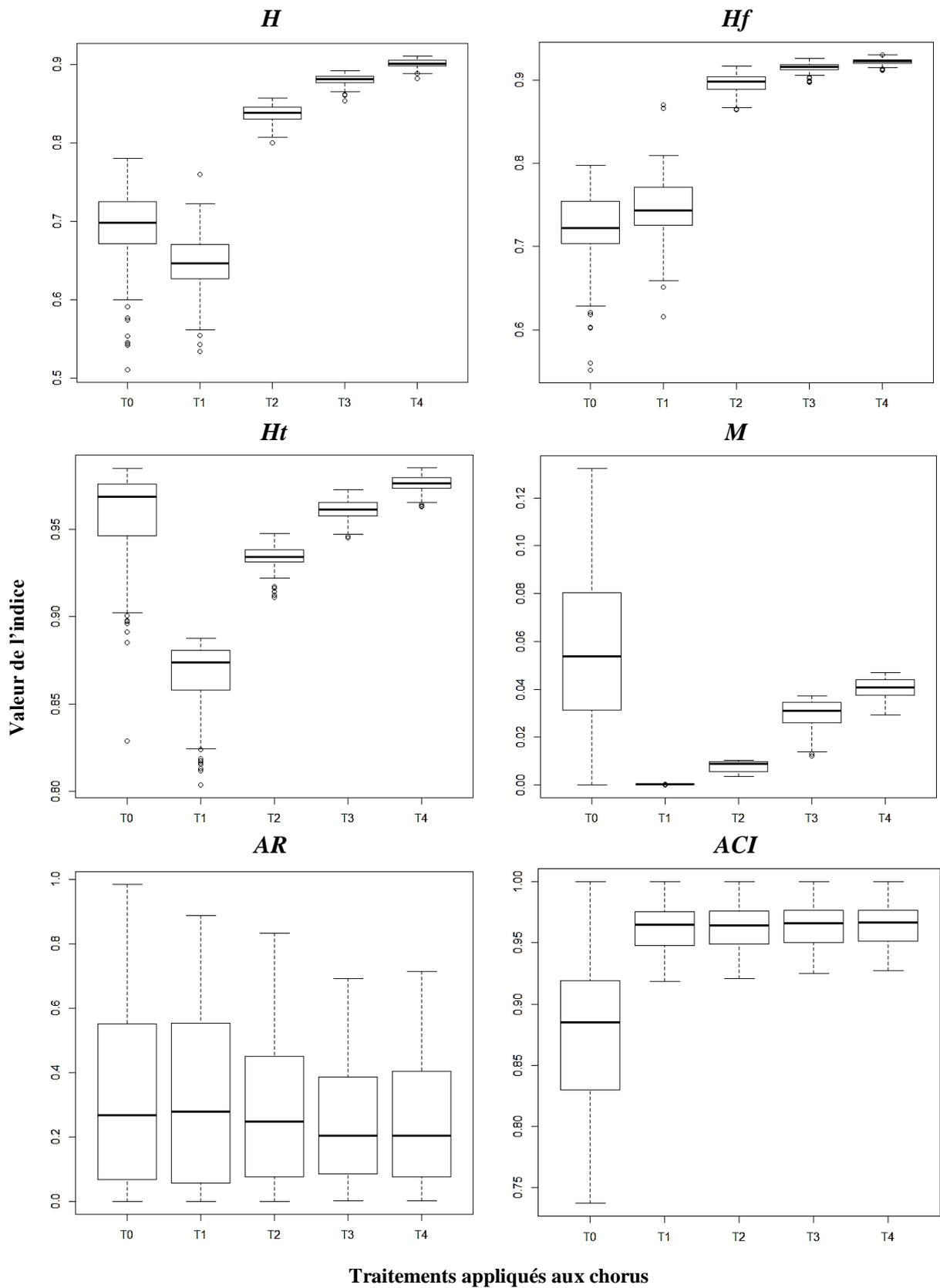


Figure 8 : Boîtes à moustache des valeurs des indices en fonction de T_0 et des 4 traitements du biais 1. **T_0** : valeurs étalons (30s), **T_1** : $T_0 + 90$ s silence, **T_2** : $T_0 + 30$ s bruit + 60 s silence, **T_3** : $T_0 + 60$ s bruit + 30 s silence, **T_4** : $T_0 + 90$ s bruit.

augmentent fortement, ce qui était attendu étant donné que les indices se basent sur l'hétérogénéité acoustique. A l'inverse, les valeurs d'*ACI* diminuent avec l'ajout de bruit ambiant. En effet, cet ajout entraîne une uniformisation globale et donc une diminution de l'hétérogénéité à laquelle l'indice est sensible.

Quant aux traitements T2 et T3, qui permettent de tester l'effet de l'amplification de l'intensité du bruit ambiant, il existe une légère augmentation des valeurs de *H*, *Hf* et *Ht* entre ces trois traitements. Les indices *M* et *AR* voient quant à eux leurs valeurs augmenter fortement et régulièrement avec l'amplification du bruit ambiant. Enfin, comme indiqué précédemment, les valeurs de l'indice *ACI* diminuent avec l'augmentation de l'intensité du bruit ambiant.

Pour conclure, *ACI* est l'indice qui varie le moins entre les 3 traitements et *Hf* est le moins sensible à l'augmentation de l'intensité du bruit ambiant.

3.2.3. Biais 3 : effet du recouvrement temporel entre les hurlements des individus composant le chorus

Les valeurs obtenues pour chacun des indices en fonction du degré de chevauchement des hurlements des individus au sein d'un chorus sont représentées sous forme de boîtes à moustache en Figure 10. L'impact des différents types de recouvrements temporels est très variable d'un indice à l'autre (Tableau 3). Une différence significative existe cependant entre les traitements pour tous les indices ($p < 2.2e-16$ pour *H*, *Hf*, *Ht*, *M* et $p = 3.06e-08$ pour *ACI*) sauf *AR* ($p = 0.84$). Les valeurs des indices *H*, *Ht*, *M* et *AR* sont plus faibles lorsque les hurlements des différents individus sont superposés au sein du chorus. De plus, les valeurs de *H*, *Ht* et *M* diminuent à mesure que le niveau de recouvrement augmente. Enfin, *Hf*, *AR* et *ACI* ont des valeurs relativement constantes entre les trois types de recouvrement.

Pour conclure, l'indice *AR* ne présente pas d'effet significatif vis-à-vis des différents recouvrements temporels entre les hurlements des individus composant un chorus ($p = 0.84$). Pour *ACI* un effet significatif est mis en évidence mais il s'avère plus faible que pour les autres indices ($p = 3.06e-08$).

3.3. Tests préliminaires sur des chorus naturels

Ces tests préliminaires, menés sur cinq chorus naturels (deux chorus de trois individus et trois chorus de six individus), ont permis d'obtenir des valeurs pour chacun des indices. Ces valeurs ont été utilisées pour prédire le nombre de loups à l'aide des régressions obtenues pour les 120

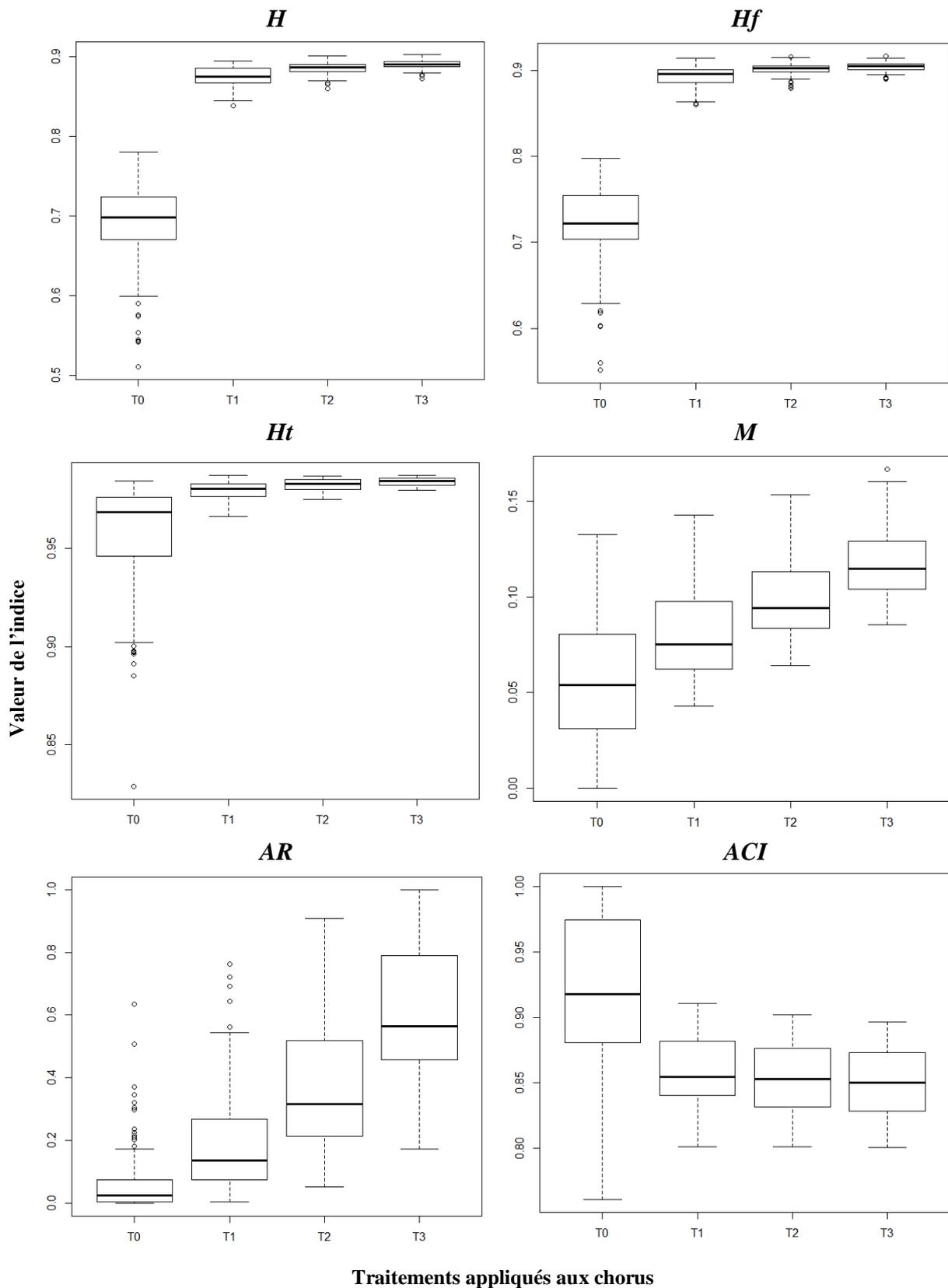
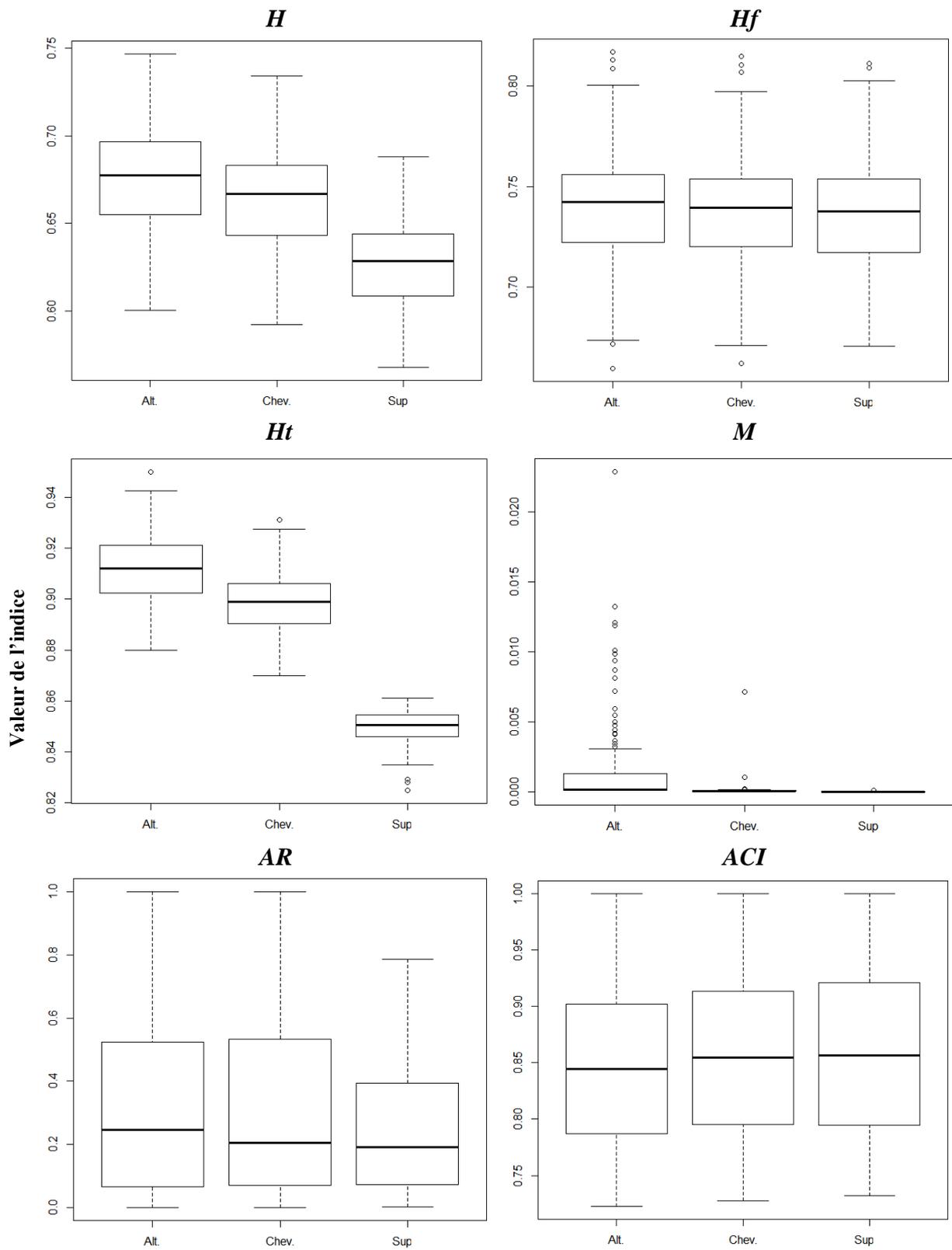


Figure 9 : Boîtes à moustache des valeurs d'indices en fonction de T0 et des 3 traitements du biais 2. **T0** : valeurs étalons (30s), **T1** : T0 + 30 s bruit d'amplitude normale, **T2** : T0 + 30 s bruit d'amplitude x50, **T3** : T0 + 30 s bruit d'amplitude x100.

chorus artificiels originaux (Figure 11). Finalement, *ACI* s'est révélé être l'indice le plus précis dans l'estimation de l'effectif de loups des chorus naturels.

Les cinq autres indices surestiment nettement l'effectif de loups des chorus naturels. Toutefois, les chorus naturels de trois individus ont bien des valeurs d'indice inférieures à celles des chorus naturels de six individus. De plus, pour des chorus naturels de même effectif, les valeurs obtenues varient plus ou moins selon les indices utilisés.



Types de recouvrement entre les individus composant les chorus

Figure 10 : Boîtes à moustache des valeurs d'indices en fonction des 3 traitements du biais 3 (superposition des hurlements dans le chorus) ; **Alt. :** T1, hurlements alternés (pas de chevauchement) ; **Chev. :** T2, hurlements se chevauchant de moitié ; **Sup. :** T3, hurlements superposés.

4. Discussion

Au regard des corrélations obtenues, tous les indices testés semblent prometteurs dans l'estimation du nombre de loups gris composant un chorus, à l'exception de *NP*. Les résultats non concluants obtenus avec ce dernier pourraient être dus au fait que les individus hurlent à plusieurs reprises au cours des chorus mais aussi de l'existence de différences de fréquence et d'amplitude à la fois entre les hurlements d'un même individu et entre les individus. Une approche similaire à celle mise en place pour l'indice *NP* a déjà été menée par Filibeck *et al.* (1982) via la détection de pics de fréquences des individus dans un chorus. Cette méthode les a conduits à dénombrer avec succès les loups hurlant dans une meute. La différence observée entre notre approche et la leur peut s'expliquer par l'effectif des chorus (plus important ici) ainsi que par la présence de plus de modulations de fréquence et d'amplitude dans notre échantillon de chorus artificiels. Ces deux points contribuent à augmenter la difficulté des analyses.

L'existence d'écart-types importants accompagnant les indices, révèle une réelle difficulté pour attribuer une valeur d'indice à un effectif précis. Or, l'objectif à l'avenir est l'analyse d'un chorus isolé (comparaison des nouvelles valeurs d'indices aux valeurs « étalon »). Toutefois, les indices *H*, *Hf* et *Ht*, qui présentent des écarts types importants pour des chorus à faible nombre d'individus, voient cette tendance s'inverser avec l'augmentation du nombre de loups. Aussi, pour les chorus à faible effectif, Passilongo *et al.* (2015) suggèrent que le dénombrement des individus d'un chorus est possible jusqu'à six individus à la seule visualisation d'un spectrogramme. Toutefois, les résultats de cette étude, s'appuyant sur des chorus issus de vidéos sélectionnées sur internet, sont peut-être à prendre avec du recul et ce type d'approche pourrait être sujette à erreurs. Par ailleurs, la présence d'un plafond atteint lorsque le nombre d'individus est important ne permet pas non plus d'estimer finement le nombre loups hurlants pour les meutes de grande taille (plus de huit - neuf loups). Les indices *M* et *AR* présentent l'avantage de ne pas atteindre ce plafond. Or, la taille des meutes dépasse rarement 10 loups en France (Duchamp *et al.* 2017), elle est en moyenne de 3 à 8 loups en Europe occidentale et jusqu'à 12 en Europe de l'est (ONCFS 2011). Ce plateau ne serait donc pas forcément atteint. Aux vues de ces résultats, plutôt que d'obtenir un nombre exact d'individus il pourrait être envisagé de rechercher des classes entre lesquelles la différence de valeur d'indice serait significative.

Si les indices semblent prometteurs, les chorus testés dans un premier temps étaient seulement composés d'extractions permettant d'obtenir un chorus artificiel sans bruit ambiant. Cette particularité a pour conséquence de permettre d'associer les valeurs obtenues, pour chacun des

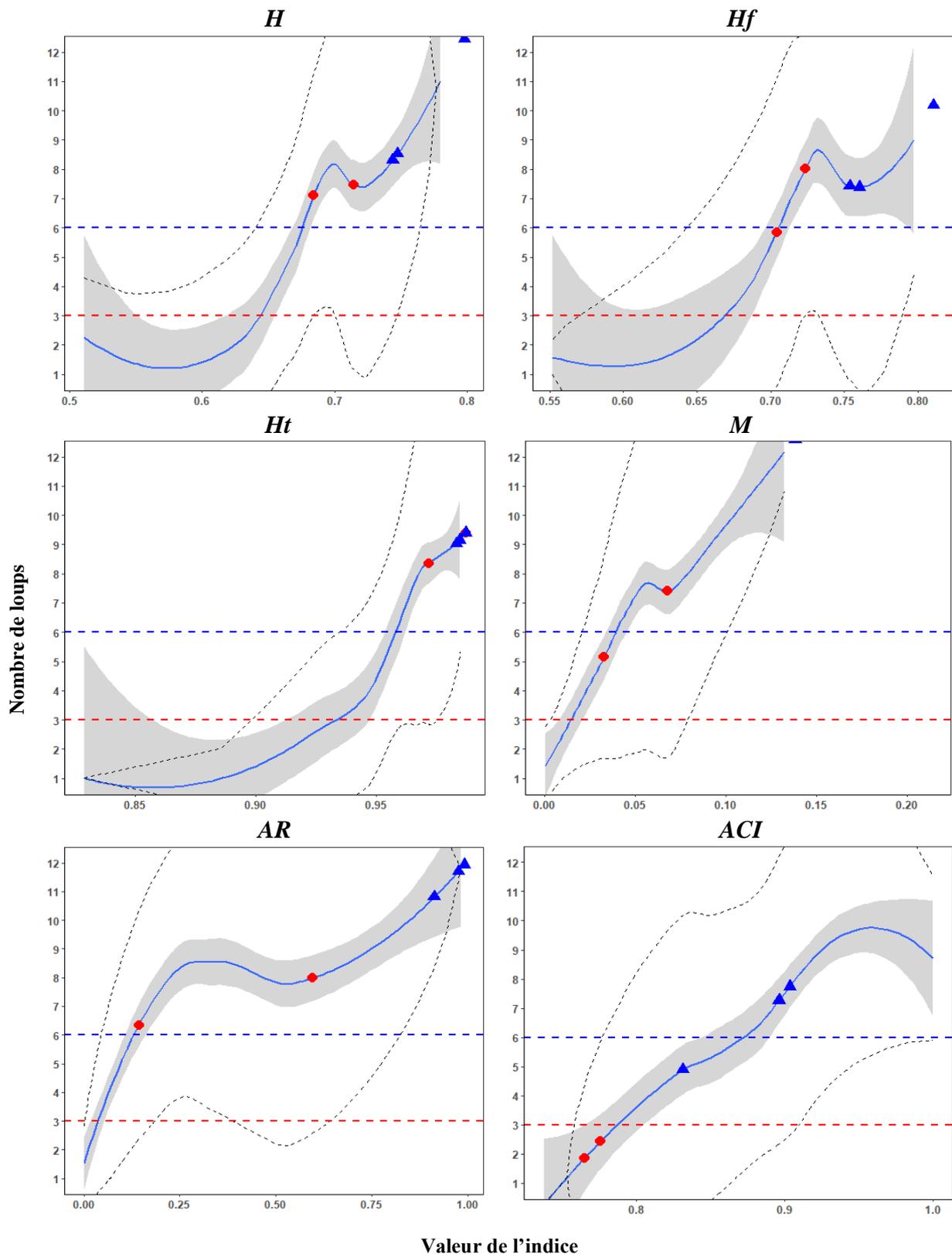


Figure 11: Prédiction du nombre de loups pour 5 valeurs d'indices calculés sur des chœurs naturels. Points rouges : 2 chœurs naturels de 3 individus ; Triangles bleu : 3 chœurs naturels de 6 individus ; Courbe bleue : régression LOESS (y =nombre de loups, en fonction de x =valeur des indices pour les 120 chœurs artificiels) ; Zone grisée : intervalle de confiance à 95% ; Pointillés noirs : intervalle de prédiction à 95% ; Ligne en pointillés rouges : $n=3$ loups ; Ligne en pointillés bleus : $n=6$ loups.

indices, à l'hétérogénéité acoustique propre au signal d'intérêt, c'est-à-dire les hurlements de loups. Pour autant, l'effet de trois autres sources d'hétérogénéité acoustique, pouvant modifier la valeur des indices et donc leur capacité à estimer correctement le nombre de loups composant un chorus, s'est avérée riche en informations.

Pour commencer, concernant le biais du rapport de la durée du chorus de loups sur la durée totale d'enregistrement, ce sont les indices *AR* et *ACI* qui ont été les moins sensibles (T1 à T4). À l'inverse, *Ht*, *M* et *ACI*, dont le calcul se base tout ou en partie sur la composante temporelle du signal, ont été plus impactés que les autres indices par la différence de longueur du fichier lors de l'ajout d'un silence simple aux chorus (T0-T1). L'indice *AR*, utilisant *Ht* et *M* pour son calcul, ne semble pas fortement impacté par ce premier traitement. Afin de limiter l'impact de ce biais sur les indices *H*, *Hf*, *Ht* et *M*, il faudrait limiter la longueur du fichier audio à la portion encadrant au plus près le signal d'intérêt. Une longueur de fichier optimale et standardisée pourrait être déterminée pour le calcul des indices, comme suggéré par Gasc *et al.* (2015). Toutefois, il serait également nécessaire d'explorer l'effet sur les indices, de différentes longueurs de fichiers audio ne comprenant que le signal d'intérêt.

La seconde source d'hétérogénéité acoustique testée était celle liée au rapport d'intensité entre le signal et le bruit ambiant. Pour ce second biais, l'ensemble des indices voient leur valeur s'accroître avec l'augmentation du bruit ambiant à l'exception de l'indice *ACI* dont la tendance est inversée. Toutefois, cet impact est beaucoup moins important pour certains indices (*H*, *Hf*). Cette différence est liée au fait que les propriétés mathématiques et acoustiques utilisées pour le calcul des indices sont différentes. L'indice *Hf* est le moins impacté par les changements d'intensité du bruit ambiant, toutefois son étendue est très faible, ce qui pourrait limiter la possibilité de différencier des chorus de taille variable. Au contraire, les indices *M*, *AR* et *ACI* présentent des étendues plus importantes mais varient beaucoup selon l'intensité du bruit ambiant. Pour rappel, l'indice *ACI* a été créé dans le but de limiter l'impact de sons anthropiques dont l'intensité est relativement constante, tels que la circulation ou le moteur d'un avion (Pieretti *et al.* 2011). Il serait donc intéressant de tester la réaction des indices sur des chorus contenant ce type de bruit ambiant en milieu naturel. Dans le cas du loup, cette idée a d'autant plus de sens que ces sons anthropiques se trouvent sur des bandes de fréquences basses tout comme les hurlements. Ainsi, l'indice *ACI* ne serait peut-être pas aussi efficace à limiter l'impact de ces sons sur l'hétérogénéité acoustique des chorus de loups qu'il ne l'est pour les chorus d'oiseaux par exemple. De plus, l'utilisation de filtres qui permettent de supprimer le bruit ambiant se trouvant à de basses fréquences (< 200 Hz dans Sueur *et al.* 2008b), n'est pas

envisageable dans notre cas puisque les fréquences des hurlements peuvent être inférieures à cette limite (e.g. 170 Hz pour les données de Papin 2014). Les résultats obtenus pour l'effet de ce second biais sur *AR* diffèrent de ceux obtenus par Gasc *et al.* (2015). En effet, dans les travaux de ces auteurs, la différence entre les trois intensités de bruit ambiant était très faible, alors que dans la présente étude, celle-ci était très forte. Ceci peut s'expliquer par le fait que le bruit ambiant ajouté aux chœurs artificiels est composé d'une forte diversité d'oiseaux qui sont probablement détectés par l'indice. Il serait donc intéressant de tester à nouveau ce biais avec un bruit ambiant présentant une diversité acoustique aviaire moins importante. En effet, les sessions de hurlements provoqués au cours desquelles pourraient être enregistrés des chœurs naturels sont le plus souvent effectuées en fin d'été - début d'automne et en fin de soirée (21h-00h), ce qui pourrait significativement réduire la présence et la diversité du bruit ambiant d'origine biologique. Le pic d'activité des chœurs aviaires a notamment lieu un peu avant et après le coucher du soleil mais ils sont fortement réduits à cette saison. À l'inverse, les orthoptères sont présents dans le paysage sonore concerné, à ces périodes et horaires, mais leurs émissions sonores sont situées dans une bande de fréquence plus haute (par exemple 5000 - 15000 Hz pour *Tettigonia cantans*, qui domine le paysage sonore concerné chez les insectes ; J. Pichenot communication personnelle) et ils ne sont donc pas gênants.

La troisième source d'hétérogénéité acoustique étudiée était liée aux différents degrés de recouvrement temporel entre les hurlements des individus composant un chœur. Dans ce cas, *AR* est de loin l'indice le moins impacté par ce biais, suivi par *ACI* et *Hf* qui le sont aussi très peu. Notons que ce biais a été évalué seulement pour un chœur composé de six individus, et qu'il serait intéressant d'évaluer son impact sur des chœurs de tailles différentes.

En complément des trois biais testés au cours de ce travail, d'autres facteurs pouvant également faire augmenter l'hétérogénéité acoustique pourraient être testés comme la composition sonore des chœurs (types de vocalisations composant le chœur) et les différences d'intensités relatives au sein d'un chœur (variabilité de l'amplitude des hurlements pour un même individu ou entre les hurlements de différents individus). En effet, les caractéristiques inter- et intra- individuelles ainsi que d'autres types d'émissions acoustiques (jappements, aboiements, grognements) pourraient également influencer la valeur des indices et complexifier les estimations.

Enfin, les tests réalisés sur les chœurs naturels enregistrés en captivité ont permis de montrer qu'*ACI* est relativement efficace pour estimer le nombre de loups composant un chœur, avec les chœurs artificiels comme références. D'autres indices (*H*, *Hf*, *M* et *AR*) différencient bien les chœurs naturels composés de trois individus d'une part et de six individus d'autre part, mais ne

les classent pas correctement vis-à-vis des chorus de référence. Ceci est très certainement dû au fait que les chorus de référence ne présentent aucun bruit ambiant contrairement aux chorus naturels. De plus, les chorus naturels testés présentent quelques hurlements fortement modulés en termes de fréquence et d'amplitude, ainsi que des vocalisations autres que les hurlements, ce qui peut aussi expliquer les valeurs importantes d'indices obtenues par rapport à celles des chorus artificiels.

Pour finir, d'autres aspects d'ordre technique pourraient également être explorés dans des investigations futures sur l'utilisation des indices de diversité acoustique pour l'estimation de l'effectif des meutes de loups gris. C'est le cas notamment du type de matériel utilisé lors des enregistrements (micro directionnel, enregistreur autonome, etc.) qui est susceptible d'influencer les valeurs d'indices. En effet, le rapport signal/bruit sera généralement plus élevé avec un micro directionnel car celui-ci permet d'éliminer une partie des sons non ciblés, contrairement aux microphones omnidirectionnels des enregistreurs autonomes. De la même manière, sans pour autant que cela fasse l'objet d'investigations, des recommandations devront être formulées quant aux périodes et lieux d'enregistrements propices à l'obtention de chorus de bonne qualité acoustique. En effet, l'ambiance sonore et la propagation du son dépendent notamment du milieu (type de végétation, topographie, etc.), de l'horaire et des caractéristiques environnementales (conditions météorologiques en particulier). Enfin, une distance maximale entre les loups en train d'hurler (émetteur) et le dispositif d'enregistrement (récepteur) devra être fixée.

5. Conclusion

Comme l'a démontré cette étude, six indices acoustiques semblent prometteurs pour l'estimation du nombre de loups gris composant un chorus. Toutefois, l'étude des trois biais a démontré que les indices *ACI* et *AR* semblent les moins sensibles à la variation de l'hétérogénéité acoustique non liée au nombre de loups composant les chorus. L'efficacité de l'indice *ACI* a été confirmée par les tests préliminaires effectués sur les chorus naturels puisque la valeur obtenue était proche de celle correspondant au nombre réel d'individus. L'indice *AR* quant à lui présente l'inconvénient de se baser sur les rangs des indices *Ht* et *M*, ce qui rend son utilisation impossible si un jeu de données étalon n'est pas disponible. De plus, l'impact d'un bruit ambiant différent de celui utilisé dans notre étude n'est pas connu. Enfin, *Ht* et *M* sont plus fortement influencés par les différents biais testés, ce qui doit donc indirectement influencer *AR*. D'autres indices de diversité acoustique de type alpha pourraient aussi être testés (e.g. *Hv* ; Towsey *et al.* 2014). Par ailleurs, la création d'un nouvel indice ou d'un super indice couplant plusieurs indices efficaces, pourrait être envisagée afin de s'adapter au mieux aux caractéristiques acoustiques des chorus de loups gris.

La méthode proposée par cette étude pourrait permettre un suivi des meutes sur le long terme, en étudiant les variations de l'indice d'une année à l'autre, afin par exemple de détecter une augmentation de la taille de la meute. Cette perspective de comparaison inter annuelle ou entre meutes pourrait par ailleurs être envisagée à travers l'utilisation des indices de dissimilarité acoustique de type β , non étudiés dans ce travail. Toutefois, il faut rappeler que la méthode testée dans ce présent travail estime l'effectif de loups composant un chorus mais pas nécessairement celui de la meute. En effet, tous les individus composant une meute n'hurlent pas forcément (Harrington 1987) et ne sont pas toujours tous réunis lors des chorus (Holt 1998). De plus, une estimation par classe d'effectif de loups dans les chorus semblerait plus appropriée au regard des écarts-types importants obtenus pour chaque indice. En l'état, le risque d'une sur ou sous-estimation doit être exploré afin d'affiner les estimations. Enfin, la constitution d'une base de données de chorus naturels (enregistrés en captivité ou en milieu naturel), dont les effectifs sont connus, permettrait d'approfondir les potentialités de cette méthode. Cette base de données permettrait en effet d'obtenir une courbe étalon pouvant servir de référence pour prédire plus finement l'effectif à partir d'enregistrements réalisés en milieu naturel.

Bibliographie et Webographie

- Audacity. 2017. Logiciel libre et multi-plateforme pour l'enregistrement et l'édition de sons. Version 2.1.3.
- Barataud M. & Tupinier Y. 2015. Ecologie acoustique des chiroptères d'Europe : Identification des espèces, étude de leurs habitats et comportements de chasse. Troisième édition. Biotope, Mèze. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (collection Inventaires et biodiversité), 344p.
- Boelman N.T., Asner G.P., Hart P.J. & Martin R.E. 2007. Multitrophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensins. *Ecological Applications*, 17: 2137-2144.
- Cleveland W.S., Devlin S.J. & Grosse E. 1988. Regression By Local Fitting. *Journal of Econometrics*, 37: 87-114.
- Cleveland W.S., Grosse E. & Shyu W.M. 1992. Local regression models. Chapter 8, *Statistical Models in S*, Eds J.M. Chambers and T.J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.
- CROC. 2014. Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2013. Rédaction : Germain E. et Pichenot P., Mai 2014, 114p.
- CROC. 2015. Bilan des programmes scientifiques et des activités pédagogiques conduits par le CROC du 1er janvier au 31 décembre 2014. Rédaction : Germain E., Pichenot P., Papin M. et Clasquin M., Mai 2015, 152p.
- Depraetere M., Pavoine S., Jiguet F., Gasc A., Duvail S. & Sueur J. 2012. Monitoring animal diversity using acoustic indices: implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators*, 13: 46-54.
- Duchamp C., Chapron G., Gimenez O., Robert A., Sarrazin F., Beudels-Jamar R. & Le Maho Y. 2017. Expertise collective scientifique sur la viabilité et le devenir de la population de loups en France à long terme sous la coordination ONCFS-MNHN de : Guinot-Ghestem M., Haffner P., Marboutin É., Rousset G., Savouret- Soubelet A., Siblet J.P., Trudelle L. 92p.
- Farina, A. & Morri, D. 2008. Source-sink e eco-field: ipotesi ed evidenze sperimentali. Atti del X congresso nazionale della SIEP-IALE. *Ecologia e governance del paesaggio: esperienze e prospettive*. Bari, 365-372.

- Filibeck U., Nicoli M., Rossi P. & Boscagli G. 1982. Detection by frequency analyzer of individual wolves howling in a chorus: A preliminary report. *Bolletino di zoologia*, 49: 151-154.
- Gasc A. 2012. Analyse et suivi de la biodiversité animale par des techniques novatrices de bioacoustique. Thèse de doctorat, sous la direction de Sueur J., Pavoine S. et Grandcolas P., 229p.
- Gasc A., Sueur J., Pavoine S., Pellens R. & Grandcolas P. 2013. Biodiversity Sampling Using a Global Acoustic Approach: Contrasting Sites with Microendemics in New Caledonia. *PLoS ONE*, 8(5): e65311.
- Gasc A., Pavoine S., Lellouch L., Grandcolas P. & Sueur J. 2015. Acoustic indices for biodiversity assessments: Analyses of bias based on simulated bird assemblages and recommendations for field surveys. *Biological Conservation*, 191: 306–312.
- Harrington F.H. 1987. Aggressive howling in wolves. *Animal Behaviour*, 35: 7-12.
- Harrington F.H. 1989. Chorus howling by wolves: acoustic structure, pack size and the Beau Geste effect. *Bioacoustics*, 2: 117-136.
- Harrington F.H. & Asa C.S. 2003. Wolf communication. In: Mech L.D., Boitani L., editors. *Wolves: behaviour, ecology and conservation*. The University of Chicago press, 448: 66-103.
- Holt T. 1998. A structural description and reclassification of the wolf, *Canis lupus*, chorus howl. M.S. thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada. 100p.
- Joo W., Gage S. H. & Kasten E. P. 2011. Analysis and interpretation of variability in soundscapes along an urban rural gradient. *Landscape and Urban Planning*, 103: 259-276.
- Kasten E., Gage S., Fox J. & Joo W. 2012. The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: an archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics*, 12: 50-67.
- Krause B., Gage S. & Joo W. 2011. Measuring and interpreting the temporal variability in the soundscape at four places in Sequoia National Park. *Landscape Ecology*, 26: 1247-1256.
- Legendre L. & Legendre P. 1984. *Écologie numérique*. Deuxième édition française, revue et augmentée : Masson, Paris, et les Presse de l'Université du Québec. 335p.

- Leonard Y., Briaudet P., Bataille A., Delacour G., Laurent A., Duchamp C. & Marboutin E. 2012. Bilan du suivi hivernal 2011/2012. Bulletin loup du Réseau Loup Lynx, 27: 13-23.
- Longis S., Leonard Y., Sèbe F. & Duchamp C. 2004. Test de la méthode du hurlement provoqué. Compte rendu suivi estival pour la reproduction du loup 2004. Quoi de neuf ? Bulletin d'information du réseau loup, 12: 5-7.
- MEDDE⁵ & MAAF⁶. 2013. Plan National d'Action Loup 2013-2017. 69 p.
- Obrist M., Pavan G., Sueur J., Riede K., Llusia D. & Márquez R. 2010. Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. *Abc Taxa*, 8: 68-99.
- ONCFS 2011. Document de formation : Le loup. Réseaux loup-lynx. ONCFS - Direction Etudes & Recherche - CNERA PAD - Equipe loup-lynx. 81p.
- ONCFS 2016a. Répartition du Loup en France depuis 2008. Portail cartographique Carmen [http://carmen.carmencarto.fr/38/Loup_presence_communale.map], consulté le 24/05/2017.
- ONCFS 2016b. Répartition du Lynx en France depuis 1987. Portail cartographique Carmen [http://carmen.carmencarto.fr/38/Lynx_presence_par_maille.map], consulté le 24/05/2017.
- Palacios V., Font E. & Marquez R. 2007. Iberian wolf howls: acoustic structure, individual variation, and a comparison with North American populations. *Journal of Mammalogy*, 88: 606-613.
- Palacios V., López-Bao J.V., Llaneza L., Fernández C. & Font E. 2016. Decoding Group Vocalizations: The Acoustic Energy Distribution of Chorus Howls Is Useful to Determine Wolf Reproduction. *PLoS ONE*, 11(5): e0153858.
- Papin M. 2014. Suivi et estimation de l'effectif des meutes de loups gris (*Canis lupus lupus*) grâce à une méthode bioacoustique : Essais et test préliminaires sur des meutes captives. Rapport de stage de Master 2, CROC, Centre de Recherche et d'Observation sur les Carnivores, Lucy, France, 35p.
- Passilongo, D., Bucciatti, A., Dessì-Fulgheri, F., Gazzola, A., Zaccaroni, M. & Apollonio, M., 2010. The acoustic structure of wolf howls in some Eastern Tuscany (Central Italy) free ranging packs. *Bioacoustics*, 19: 159–175.

⁵ Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie.

⁶ Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la Forêt.

- Passilongo D., Mattioli L., Bassi E., Szabó L. & Apollonio M. 2015. Visualizing sound: counting wolves by using a spectral view of the chorus howling. *Frontiers in Zoology*, 12: 22.
- Pekin B.K., Jung J., Villanueva-Rivera L.J., Pijanowski B.C. & Ahumada J.A. 2012. Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest. *Landscape Ecology*, 27: 1513-1522.
- Pieretti N., Farina A. & Morri F.D. 2011. A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*, 11: 868-873.
- Root-Gutteridge H., Bencsik M., Chebli M., Gentle L.K., Terrell-Nield C., Bourit A. & Yarnell R.W. 2014a. Improving individual identification in captive Eastern Grey Wolves (*Canis lupus lycaon*) using the time course of howl amplitudes. *Bioacoustics* 23: 39-53.
- Root-Gutteridge H., Bencsik M., Chebli M., Gentle L.K., Terrell-Nield C., Bourit A. & Yarnell R.W. 2014b. Identifying individual wild Eastern grey wolves (*Canis lupus lycaon*) using fundamental frequency and amplitude of howls. *Bioacoustics*, 23: 55-66.
- RStudio Team. 2017. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, <http://www.rstudio.com/>, Version 1.0.153.
- Rychtáriková M. & Vermeir G. 2013. Soundscape categorization on the basis of objective acoustical parameters. *Applied Acoustics*, 74: 240-247.
- Sèbe F., Heitz N., Latini R. & Aubin T. 2004. Le wolf howling, un outil pour le recensement et la conservation des loups: possibilités et limites de la méthode. *Recherches Naturalistes en Région Centre*, 14: 53-59.
- Sèbe F. 2012. La bioacoustique : un outil d'avenir pour le suivi et la gestion des espèces animales. *Faune Sauvage*, 295: 4-7.
- SONY SpectraLayers Pro. 2013. SONY Creative Software. Version 2.0.
- Sueur J., Aubin T., Simonis C. 2008a. Seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18: 213-226.
- Sueur J., Pavoine S., Hamerlynck O. & Duvail S. 2008b. Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal. *PLoS ONE*, 3: e4065.

- Sueur J., Gasc A., Grandcolas P. & Pavoine S. 2012. Global estimation of animal diversity using automatic acoustic sensors. In: Sensors for ecology, Editors Le Gaillard J.-F., Guarini J.-M., Gaill F. Paris, CNRS, 99-117.
- 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: 772-781.
- Theberge, J.B. & Falls J.B. 1967. Howling as a means of communication in timber wolves. *American Zoologist*, 7: 331–338.
- Tooze Z.J., Harrington F.H. & Fentress J.C. 1990. Individually distinct vocalizations in timber wolves, *Canis lupus*. *Animal Behaviour*, 40: 723-730.
- Towsey M., Wimmer J., Williamson I. & Roe P. 2014. The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. *Ecological Informatics*, 21: 110-119.
- UICN France, MNHN, SFEPM & ONCFS. 2009. La Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Mammifères de France métropolitaine. Paris, France, 12p.
- Villanueva-Rivera L. J. 2007. Digital recorders increase detection of Eleutherodactylus frogs. *Herpetological Review*, 38: 59-63.
- Zaccaroni M., Passilongo D., Buccianti A., Dessì-Fulgheri F., Facchini C., Gazzola A., Maggini I. & Apollonio M. 2012. Group specific vocal signature in free-ranging wolf packs. *Ethology Ecology & Evolution*, 24: 322-331.

Annexes

Annexe 1 : Diagramme de Gantt présentant le programme de réalisation de ce stage.

	Mois	Mars					Avril					Mai					Juin				Juillet				Août				
	Semaines	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
Taches																													
Point hebdomadaire/suivi avancement*																													
*Sous forme de fiche transmise par mail les lundi, et entretien si besoin.																													
Recherche bibliographique sur les indices																													
Réunion point synthèse (équipe)					21																								
Présentation de ma synthèse à l'équipe (Power Point)						3																							
Analyses																													
Familiarisation avec le logiciel seewave																													
Document de réflexion sur les analyses à réaliser (support réunion)																													
Réunion point analyse (équipe)										28			17	22			8	12			7								
Calcul des indices																													
Tests paramétrages des indices sous Seewave																													
Tests découpes temporelles des fichiers audio																													
Sélection d'ambiances sonores																													
Création de nouveaux chorus les biais 3 et 4																													
Tests sur les biais																													
Rédaction du rapport																													
Rendu pré-rapport pour relecture														9			22												
Rendu définitif pré-rapport																	28												
Rendu rapport pour relecture + révisions																									3				
Rendu définitif rapport																										20			
Power Point pour oral																													
Rendu pour relecture + entraînements																													
Rendu définitif Power Point oral																										21			
Oral																											30		

Légende



taches principales



21 point clé (réunion ou échéance) (date du rendu)



28 rendus pour la fac (date du rendu)



durée de la tache principale

...

prolongement de la tache principale en cas de besoin



durée d'une tache

...

prolongement de la tache en cas de besoin

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des individus composant les chorus artificiels (modifié à partir de Papin 2014).

Parc animalier	Individu	Code identifiant	Sexe	Année de naissance
PASC (3 loups enregistrés sur une meute de 4)	Amande	A	F	2002
	Coyote	Co	F	2008
	Zorro	Z	M	2003
PASC (7 loups enregistrés sur une meute de 9)	Alix	Al	F	2010
	Ana	An	F	2010
	Aron	Ar	M	2005
	Cerbère	Cer	M	2012
	Chaussette	Cha	F	2012
	Cheyenne	Che	M	2012
	Lola	Lo	F	2005
PESCH (2 loups enregistrés sur une meute de 10)	Grimlins	G	F	2007
	Léa	L	F	2004

Abréviations :

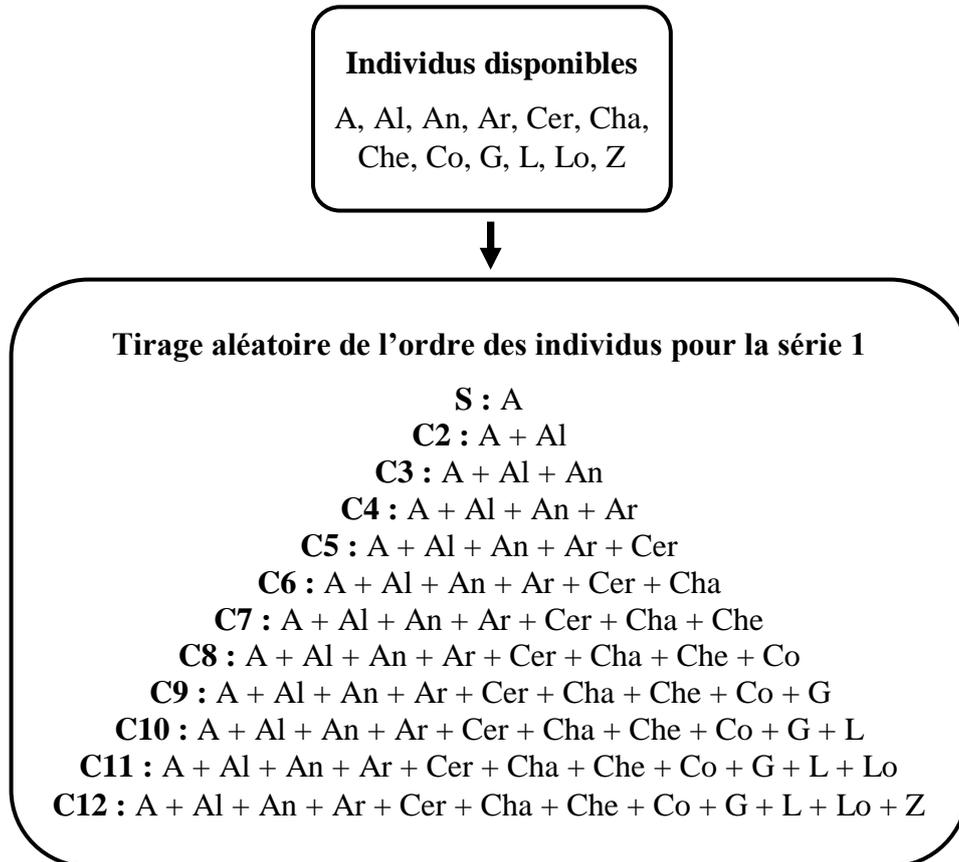
M : Mâle ; F : Femelle ; PASC : Parc Animalier de Sainte Croix (France, Moselle) ;
PESCH : Domaine de Pescheray (France, Sarthe).

Annexe 3 : Démarche de constitution des chorus artificiels de Papin (2014), exemple de la série 1

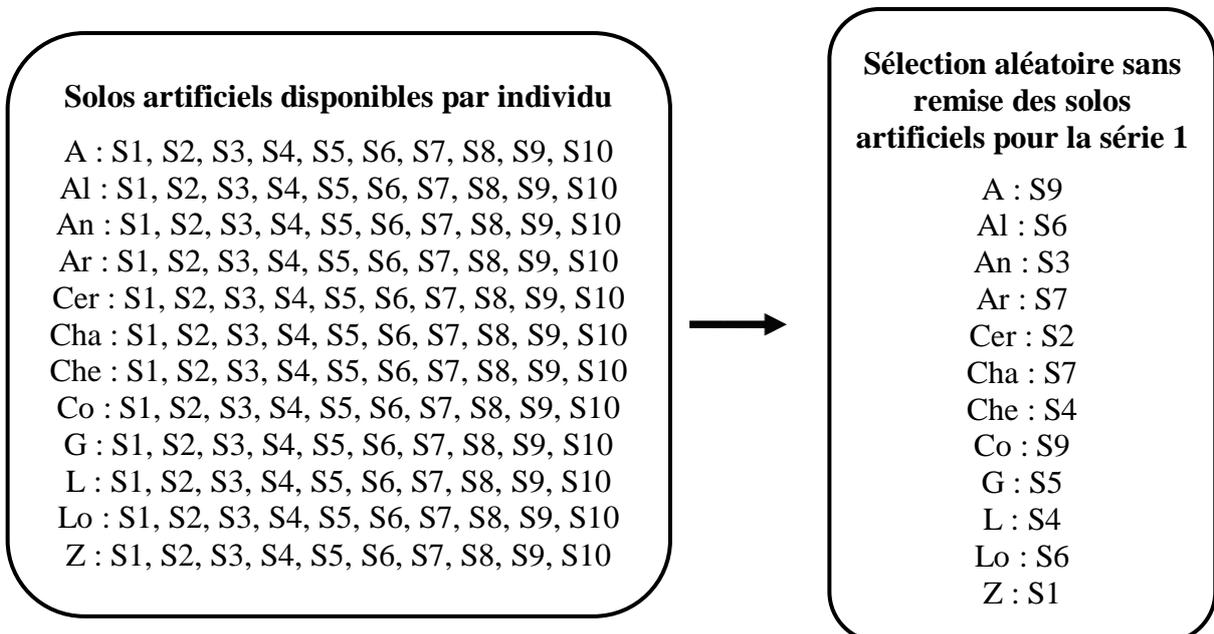
S : Solos artificiels ; C2 à C12 : Chorus artificiels de 2 individus à 12 individus,

S1 à S12 : Solo artificiel 1 à 10 de chaque individu.

Etape 1 : Composition en individus des chorus (répété pour 10 séries, avec remise)



Etape 2 : Finalisation des chorus avec la sélection du solo artificiel par individu (répété pour les 10 séries, sans remise des solos artificiels entre séries)



Les indices de diversité acoustique ont été récemment développés pour obtenir une évaluation de la biodiversité. Ils mesurent l'hétérogénéité acoustique produite par la faune dans un milieu naturel. Parmi les indices existants, ceux de type α mesurent la diversité en espèces d'une communauté en étudiant les variations fréquentielles et temporelles du signal sonore de celle-ci. Dans le cadre du présent travail, nous avons voulu savoir si ces indices pouvaient être détournés de leur usage initial pour estimer l'effectif des chorus de meutes de loups gris (*Canis lupus*). Au total, sept indices de type α (*Hf*, *Ht*, *H*, *M*, *AR*, *ACI*, *NP*) ont été calculés à partir de chorus artificiels créés avec des effectifs allant de un à douze loups. L'existence d'une corrélation positive entre le nombre d'individus et la valeur de l'indice a été mise en évidence pour six des indices testés. Toutefois, l'hétérogénéité acoustique sur laquelle ces indices se basent peut être influencée par d'autres facteurs que le nombre d'individus composant les chorus (trois biais testés). Finalement, les indices *ACI* et *AR* semblent être les plus prometteurs et fournissent une nouvelle approche innovante pour le suivi de l'effectif des meutes de loups gris. Une étude basée sur des chorus naturels (de taille connue) permettrait de compléter ces résultats et de fournir un outil opérationnel non invasif pour le suivi des meutes.

Mots clés : indices acoustiques, *Canis lupus*, chorus, hurlements, simulations, biais, suivi d'espèce

Acoustic diversity indices were recently developed for biodiversity evaluation. They measure acoustic heterogeneity generated by fauna in natural environment. Among these existing indices, α indices measure the species diversity in a community, by studying frequency and temporal variations of the community acoustic signal. In our study, we explored if acoustic diversity indices could be used for other objectives like the estimation of gray wolves (*Canis lupus*) number in pack choruses. A total of seven α type indices (*Hf*, *Ht*, *H*, *M*, *AR*, *ACI*, *NP*) have been calculated with artificial choruses composed of one to twelve wolves. A positive correlation between the number of wolves and the indices values has been highlighted for six of the seven indices tested. However, these indices are based on the acoustic heterogeneity that appeared to be influenced by factors other than the number of individuals composing the choruses (three biases tested). Finally, *ACI* and *AR* appear to be the most promising indices and provide a new innovative approach for monitoring pack sizes. A complementary interesting study based on natural choruses (known pack sizes) would complete these results to conduce to an operational and non-invasive tool for wolf pack monitoring.

Keywords: acoustic indices, *Canis lupus*, chorus, howls, simulations, bias, species monitoring