

Université de Montréal

**Dynamique de la biodiversité dans la Serra do Itajaí,  
Brésil : une approche bioacoustique de la conservation**

Par

Marie-Claude Provost

Département de géographie

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de Maître ès Science (M.Sc.)  
en géographie

Octobre 2010

© Marie-Claude Provost, 2010

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

Dynamique de la biodiversité dans la Serra do Itajaí, Brésil :  
une approche bioacoustique de la conservation

Présenté par :  
Marie-Claude Provost

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Lael Parrott, président-rapporteur  
Paul Comtois, directeur de recherche  
Lúcia Sevegnani, membre du jury

## Résumé

Le suivi des populations animales et végétales nous a amené à constater une perte importante de la diversité biologique. Les objectifs de la Convention sur la diversité biologique à atteindre pour 2010 sous-tendent la poursuite détaillée de ce suivi à l'échelle mondiale (CBD 2000). Cependant, il est difficile d'avoir une perception d'ensemble de la biodiversité d'un territoire, car les écosystèmes sont des entités dynamiques et évolutives, dans l'espace et dans le temps. Le choix d'un indicateur relevant de l'ensemble des ces caractéristiques devient donc primordial, bien qu'il s'agisse d'une tâche laborieuse. Ce projet propose d'utiliser la bioacoustique comme indicateur environnemental pour faire le suivi des espèces animales en milieu tropical. Afin de faire un suivi à une échelle régionale de la biodiversité, et ce, dans l'un des biomes les plus menacés de la planète, soit celui de la *Mata Atlântica* brésilienne, ce projet de recherche a comme objectif général de démontrer qu'il est possible d'associer la biophonie (événements sonores), à des événements biologiques (la richesse spécifique animale) en quantifiant des événements sonores (à l'aide des chants produits par les oiseaux, les insectes chanteurs de même que par les anoures) et en tentant de les associer aux fluctuations de la biodiversité. En plus de répondre à cet objectif général, trois objectifs spécifiques ont été définis : 1) comparer la biophonie et l'anthropophonie de milieux soumis à différents niveaux d'anthropisation ou de conservation afin d'évaluer l'impact anthropique sur le milieu, 2) évaluer la variabilité spatiale de la biodiversité, de même que 3) sa variabilité temporelle. Les résultats ont démontré que la biophonie est représentative de la biodiversité d'un milieu, et ce, même dans des conditions de biodiversité maximale puisqu'il existe une très forte relation entre les deux variables. De plus, les résultats révèlent une différence significative dans le ratio anthropophonie/biophonie de milieux soumis à différents niveaux de protection du territoire. La différenciation d'indices de puissance relative (dB/kHz) nous indique également l'importance de la variabilité spatiale et temporelle de la biodiversité, et par conséquent, l'importance de faire le suivi des espèces dans divers milieux et à diverses périodes afin d'obtenir une vision adéquate de la biodiversité régionale.

**Mots-clés** : Bioacoustique, biodiversité, conservation, aire protégée, indicateur, phénologie

## **Abstract**

Recent monitoring of plant and animal populations has led us to observe a significant loss of global biodiversity. The objectives of the Convention on Biological Diversity for 2010 are to encourage environmental monitoring worldwide (CBD 2000). However, it is difficult to have an adequate portrait of the overall biodiversity of an area, because ecosystems are dynamic and evolving in both space and time. The choice of an indicator is therefore essential. This project proposes to use bioacoustics as an environmental indicator to monitor the animal biodiversity in tropical areas, in one of the most threatened biomes on the planet, the Mata Atlantica in Brazil. Our aim is to demonstrate that it is possible to relate biophony (sound events) to biological events (punctual animal species richness), i.e. to quantify songs produced by birds, insects and anurans singers and associate them to changes in biodiversity. In addressing this overall goal, three specific objectives were put forward: 1) compare the biophony and anthropophony of different landscapes, subjected to different levels of human occupation and conservation, in order to assess the human impact on the environment, 2) assess the spatial variability of biodiversity, as well as 3) its temporal variability. Results showed that biophony is representative of the biodiversity of an area, even under conditions of maximum biodiversity such as found in Brazil because there is a very strong positive relationship between these two variables. In addition, the results show a significant difference in the ratio anthropophony/biophony in environments subject to different human impacts. Disparate indices of relative power (dB / kHz) also reveal the importance of spatial and temporal variability of biodiversity, and therefore the importance of monitoring biophony in different environments and at different times to obtain an adequate portrait of a region's biodiversity.

**Keywords:** Bioacoustics, biodiversity, conservation, protected area, indicator, phenology

## Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Liste des symboles et des abréviations.....	xi
Remerciements.....	xiii
Introduction.....	1
Chapitre 1. Contexte de recherche.....	4
1.1. Le Brésil et la <i>Mata Atlântica</i> .....	4
1.1.1. La Mata Atlântica.....	7
1.2. Indicateur de biodiversité : la bioacoustique.....	17
1.2.1. Oiseaux en tant qu'indicateur.....	19
1.2.2. Historique de la bioacoustique.....	21
1.2.3. Les applications de la bioacoustique.....	23
1.3. Le signal sonore et la communication animale.....	28
1.3.1. Principes de base du signal sonore.....	28
1.3.2. Le paysage sonore.....	32
1.3.3. Adaptation du signal sonore chez les animaux.....	34
Chapitre 2. Objectifs et méthodologie.....	38
2.1. Objectifs.....	38
2.2. Méthodologie.....	39
2.2.1. Sites d'étude.....	39
2.2.2. Stratégie d'acquisition des données.....	40
2.2.3. Plan d'échantillonnage.....	47
2.2.4. Catégorisation de la biophonie.....	50
2.2.5. Traitement des données.....	51
2.2.6. Analyse du signal sonore.....	54
2.2.7. Analyses statistiques.....	58
Chapitre 3. Résultats.....	60
3.1 Statistiques descriptives des sites échantillonnés.....	60
3.2 La biophonie et la biodiversité.....	63
3.3 L'anthropophonie et la biophonie.....	70

3.4 Variabilité spatiale .....	74
3.5 Variabilité temporelle .....	79
3.6 Sommaire des résultats.....	84
Chapitre 4. Discussion .....	87
4.1 Relation entre la biophonie et la biodiversité en milieu tropical .....	87
4.2 Anthropophonie et biophonie.....	89
4.3 Variabilité spatiale de la biophonie.....	92
4.4 Variabilité temporelle de la biophonie.....	94
4.5 Biophonie en tant qu'indicateur de la biodiversité .....	96
4.6 Limites de la méthode .....	100
4.7 Applications de la méthode.....	101
Chapitre 5. Conclusion.....	103
Références.....	106

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b> Diversité des vertébrés au Brésil et dans le monde (modifié de la World Wildlife Fund, 2009).....	4
<b>Tableau 1.2.</b> La superficie des biomes brésiliens (modifié de SOS Mata Atlântica, 2004) .	6
<b>Tableau 1.3.</b> Aire originale de la <i>Mata Atlântica</i> comprenant l'État de Santa Catarina dans lequel se déroule le présent projet (modifié de MMA, 2002).....	9
<b>Tableau 1.4.</b> Principales librairies d'archives de sons (modifié de Ranft, 2004). .....	22
<b>Tableau 2.1.</b> Caractéristiques des trois sites d'étude .....	46
<b>Tableau 3.1.</b> Statistiques descriptives des variables « période » et « milieu » de la biophonie de chacun des sites. ....	61
<b>Tableau 3.2.</b> Résultats des échantillons en fonction des variables « période » et « milieu » pour chacun des sites.....	62
<b>Tableau 3.3.</b> Résultats des valeurs de biophonie prélevées en zone tempérée nordique à l'Isle-aux-Grues, zone boréale à l'Ile d'Anticosti et en milieu tropical dans le biome de la <i>Mata Atlântica</i> .....	64
<b>Tableau 3.4.</b> Résultats des corrélations de Spearman Biophonie/Anthropophonie (biophonie totale, biophonie des insectes de type A et B) effectuées pour l'ensemble des milieux et des périodes ( logiciel <i>SPSS</i> version 17.0) .....	73
<b>Tableau 3.5.</b> Résultats des corrélations de Spearman Biophonie/Anthropophonie (biophonie des oiseaux de type A et B, biophonie des batraciens) effectuées pour l'ensemble des milieux et des périodes (logiciel <i>SPSS</i> version 17.0) (suite).....	74
<b>Tableau 3.6.</b> Résultats du test de Kruskal-Wallis pour l'anthropophonie et la biophonie des différents sites échantillonnés (logiciel <i>SPSS</i> version 17.0) .....	75
<b>Tableau 3.7.</b> Résultats du test de Kruskal-Wallis pour l'anthropophonie et la biophonie des différents milieux échantillonnés (logiciel <i>SPSS</i> version 17.0) .....	76
<b>Tableau 3.8.</b> Résultats du test de Kruskal-Wallis pour l'anthropophonie et la biophonie des différentes périodes échantillonnés (logiciel <i>SPSS</i> version 17.0).....	79

## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Les biomes brésiliens.....	6
<b>Figure 1.2.</b> Représentation de la forêt atlantique et de ses différentes physiologies sur le territoire brésilien. On y retrouve en ordre de la légende les terrains en altitude et zones de tensions écologique; la forêt saisonnière décidue; la forêt saisonnière semi-décidue, la forêt ombrophile ouverte, la forêt ombrophile dense, la forêt ombrophile mixte et les formations pionnières (le jaune pâle étant des biomes autres que celui de la <i>Mata Atlântica</i> ). .....	8
<b>Figure 1.3.</b> Aires initiales et résiduelles de la <i>Mata Atlântica</i> depuis la dernière glaciation. Comme l'indique la légende, le vert représente l'aire restante de la forêt atlantique alors qu'en jaune on retrouve l'aire initiale datant de la dernière glaciation sur le territoire brésilien. ....	12
<b>Figure 1.4.</b> Relation linéaire entre l'indice national de la biodiversité de plusieurs pays et le nombre d'espèces d'oiseaux de ces mêmes pays.....	20
<b>Figure 1.5.</b> A) La biophonie Oiseaux à IAG et à MTL en septembre 2004. (Laporte, 2005). B) La température moyenne quotidienne et les biophonies O-I-B à l'Isle aux-Grues au mois de septembre (Laporte, 2005).....	26
<b>Figure 1.6.</b> Schéma récapitulatif des différentes fonctions du chant .....	29
<b>Figure 1.7.</b> Amplitude (correspond à la distance entre le maximum de l'onde et l'axe horizontal, alors que la longueur d'onde correspond à la distance entre deux sommets) (Musée des sciences et de la technologie du Canada, 2010).....	30
<b>Figure 1.8.</b> Le paysage sonore (Gage, 2005).....	33
<b>Figure 2.1.</b> Les trois sites à l'étude localisés dans la ville de Blumenau, État de Santa Catarina, Brésil (Wikipédia, 2010). .....	40
<b>Figure 2.2.</b> Photographies des différents milieux prises entre le 3 et le 11 juillet 2009 dans le parc écologique de Spitzkopf, Blumenau (Marie-Claude Provost, 2009).....	42
<b>Figure 2.3.</b> Photographies prises entre le 14 juin et le 24 juin 2009, Pousada Rio da Prata, SC, Brésil (Marie-Claude Provost, 2009). .....	44
<b>Figure 2.4.</b> Photographies prises entre le 25 juin et le 4 juillet, Gaspar, Brésil (Marie-Claude Provost, 2009).....	45

<b>Figure 2.5.</b> Enregistreur audio de marque <i>Marantz Professional PMD660</i> (www.sonstudio.com).....	48
<b>Figure 2.6.</b> Appareil <i>Kestrel 4000</i> , <i>Kestrel 2010</i> . .....	49
<b>Figure 2.7.</b> Caractérisation de la biophonie. Biophonie-A correspond aux intervalles de fréquences engendrés par les chants des anoues, Biophonie-I des insectes et Biophonie-O des oiseaux (Gage <i>et al.</i> , 2005). .....	51
<b>Figure 2.8.</b> Oscillogramme (logiciel <i>CoolEdit Pro version 2.1</i> ) d'une durée de 22 min. 30 sec. et coupé en sous-échantillon de 30 secondes en vue de l'analyse. ....	52
<b>Figure 2.9.</b> Fonction <i>Band Filter</i> du logiciel <i>Raven Pro version 1.4</i> . Une fois la commande <i>BandStop</i> sélectionnée, il faut ajuster les paramètres de <i>Lower limit</i> à 0 Hz et de <i>Upper Limit</i> à 500 Hz. ....	53
<b>Figure 2.10.</b> Échantillon de 30 secondes ( <i>GAS-4-01004 (5) wav.</i> ) avant et après le filtrage. L'oscillogramme de gauche indique une plus grande étendue des fréquences alors qu'une fois filtré, cette étendue se voit diminuée. ....	54
<b>Figure 2.11.</b> La densité spectrale de puissance de l'échantillon sonore RIO1004 (6) prélevé à la <i>Pousada Rio da Prata</i> le 20 juin 2009 à 7h00 généré par MATLAB. La puissance est exprimée en dB/Hz sur une échelle négative en fonction des fréquences (Hz). Ce graphique représente la distribution de la puissance au sein du spectre sonore.....	56
<b>Figure 2.12.</b> Le calcul de la biophonie dans MATLAB Exemple de code de <i>Biophonie</i> © (à gauche) et les formules du calcul final des trois biophonies.....	57
<b>Figure 2.13.</b> Résultat de l'analyse à l'aide du programme <i>Biophonie</i> © affiché sous forme d'un tableau dans le chiffrier Excel ( $\times 10^6$ ) La valeur encadrée équivaut donc à l'énergie spectrale de l'échantillon. ....	58
<b>Figure 3.1.</b> La biodiversité et la moyenne de biophonie (dB/Hz) exposés à différents milieux. ....	66
<b>Figure 3.2.</b> La biophonie (dB/Hz) en fonction de la biodiversité avicole.....	67
<b>Figure 3.3.</b> Biophonie moyenne (dB/Hz) et biodiversité (nombre d'espèces) dans le parc écologique de <i>Spitzkopf</i> . ....	67
<b>Figure 3.4.</b> Biophonie moyenne des batraciens enregistrée aux différents sites.....	68
<b>Figure 3.5.</b> Biophonie moyenne des oiseaux aux différents sites .....	69
<b>Figure 3.6.</b> Biophonie moyenne des insectes aux différents sites.....	69

<b>Figure 3.7.</b> Biophonie moyenne en fonction de l’anthropophonie moyenne aux trois sites à l’étude.....	71
<b>Figure 3.8.</b> Association entre la biophonie et l’anthropophonie pour l’ensemble des échantillons toutes périodes et milieux confondus.....	71
<b>Figure 3.9.</b> Relation entre l’anthropophonie et le nombre de visiteurs/an .....	72
<b>Figure 3.10.</b> Biophonie moyenne selon les différents milieux.....	77
<b>Figure 3.11.</b> Biophonie moyenne pour le milieu forestier .....	78
<b>Figure 3.12.</b> Biophonie moyenne pour le milieu ouvert .....	78
<b>Figure 3.13.</b> Biophonie moyenne enregistrée à chaque site pour chacune des périodes.....	80
<b>Figure 3.14.</b> Biophonie moyenne enregistrée au cours de la période aube.....	81
<b>Figure 3.15.</b> Biophonie moyenne pour la période crépuscule1 .....	82
<b>Figure 3.16.</b> La biophonie moyenne à chaque site pour la période crépuscule2.....	82
<b>Figure 3.17.</b> La biophonie moyenne enregistrée au fil des jours (consécutifs) à l’ensemble des sites. Le jour 1 correspond au 14 juin 2009 et le jour 26 au 13 juillet 2009.....	83

## Liste des symboles et des abréviations

$\alpha$	niveau de signification
AIB	année internationale de la biodiversité
ANT	anthropique
APA	Área de proteção ambiental
APREMAVI	Associação de Preservação do Meio Ambiente e da Vida
CBD	Convention on Biological Diversity
CEVL	Computational Ecology and Visualisation Laboratory
dB	décibel
FQRNT	fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies
GAS	réserve naturelle de Gaspar
FURB	Université régionale de Blumenau
Hz	hertz
IAG	Isle-aux-Grues
IBAC	The International Bioacoustics Council
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente E Dos Recursos Naturais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MA	Mata Atlântica
MTL	Montréal
p	probabilité
PNSI	parc national de la Serra do Itajaí
r	coefficient de corrélation
RBMA	réserve de biosphère de la <i>Mata Atlântica</i>
REAL	Remote Environmental Assessment Laboratory
RIO	pousada Rio da Prata
RPPN	réserve particulière de patrimoine naturel
SPZ	parc écologique de Spitzkopf
UNDP	United Nations Development Programme
UICN	International Union for Conservation of Nature,
WWF	World Wildlife Fund

*The noise from the insects is so loud, that it may be heard even in a vessel anchored several hundred yards from the shore; yet within the recesses of the forest a universal silence appears to reign.*

*Charles Darwin, Mata Atlântica, Brésil*

*The Voyage of the Beagle, 1939, pg. 11*

## Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche Paul Comtois pour son encadrement généreux et pour m'avoir fait découvrir la bioacoustique. Je vous suis très reconnaissante pour votre disponibilité et votre confiance. J'ai eu beaucoup de plaisir à réaliser ce projet sous votre direction !

Je tiens également à souligner la contribution de Lúcia Sevegnani qui a veillé au bon fonctionnement du projet au Brésil et qui a contribué à la réalisation des travaux sur les différents sites d'études. Merci également pour ton accueil chaleureux et les délicieux repas partagés à la maison.

Merci à Gilles Costisella et à Rodolphe Gonzales qui ont grandement facilité la rédaction de ce projet grâce à leurs talents d'informaticiens et leurs nombreux trucs qui m'ont permis de sauver plusieurs heures de travail, de même qu'à ma partenaire au laboratoire de bioacoustique, Catalina Bonilla.

Je remercie également le FQRNT pour son importante contribution financière, et mes parents pour m'avoir encouragé tout au long de mes études. Je vous en suis très reconnaissante.

Enfin, j'offre un merci spécial à la famille brésilienne Medeiros (João, Mara, Marilú João Luiz e Pedro), de même qu'à la famille de Noemia Bohn, pour m'avoir hébergé durant le terrain. Merci pour votre accueil chaleureux, vos repas délicieux et pour votre joie de vivre! Merci pour vos encouragements très tôt le matin et lors des jours de pluie! Je n'oublierai jamais tout ce que vous avez fait pour moi. Obrigada por tudo!

## **Introduction**

Pas moins de 1,9 millions d'espèces animales, de plantes, de champignons et de micro-organismes connus de même qu'une multitude d'espèces encore à découvrir contribuent au maintien de l'équilibre terrestre. Que ce soit par la création et la protection des sols, la régulation des eaux, la protection du littoral ou le contrôle du climat, la biodiversité réduit les risques d'inondations, de catastrophes naturelles, d'érosion des sols et de changements climatiques (Elridge, 1998). Pour l'être humain, elle joue un rôle tout aussi important puisque qu'elle représente un apport nutritif par les plantes et animaux, des sources d'énergie multiples, en plus de combler les besoins d'ordres esthétiques, culturels, récréatifs et professionnels. Définie comme « la totalité de toutes les variations de tout le vivant », (CBD, 2003) la diversité biologique est également porteuse du potentiel évolutif qui assure la capacité d'adaptation des espèces devant les nombreux changements induits par le façonnement du paysage par l'Homme (CBD, 2003). En juin 1992, plus de 160 pays ont ratifié la Convention sur la Diversité Biologique (CBD) signée à Rio, témoignant ainsi de l'importance qui lui est accordée au sein de la communauté internationale (UNDP, 2008).

Par conséquent, le suivi de l'évolution des espèces animales et végétales s'avère important, d'autant plus qu'un meilleur suivi des espèces figure parmi les objectifs de la Convention sur la diversité biologique à atteindre pour 2010 (CBD, 2000). À l'aube de l'année 2010, nommée Année Internationale de la Biodiversité (AIB) par l'Assemblée générale des Nations Unies, les objectifs sont loin d'être atteints. Il faut donc prendre des mesures importantes afin de pallier à ce retard.

Bien que le nombre exact d'espèces éteintes soit inconnu, on estime que le taux actuel d'extinction est le plus élevé depuis les 100 000 dernières années (Elridge, 1998). Face à la dégradation intense de l'environnement par la destruction des habitats, la pollution de l'eau, de l'air et des sols, ou encore par l'introduction d'espèces exotiques,

surviennent des dommages irréparables à l'ensemble des écosystèmes. Malgré les nombreuses stratégies d'action mises de l'avant pour contrer ce phénomène, il reste encore beaucoup à faire afin d'éviter l'extinction de plusieurs espèces. Des statistiques récentes indiquent d'ailleurs une diminution de 25 % de la biodiversité terrestre de 1970 à 2000 (Loh, 2005). Or, moins de 1 % de la surface des mers et des océans (qui couvre 70 % du globe) est protégée, et le cinquième des pays du monde protège moins de 1 % de leur territoire (PNUE, 2007).

Le Brésil étant le pays ayant l'une des plus grande biodiversité du globe, il est important de le mettre en tête de liste pour préserver ses nombreuses espèces dont une proportion importante est endémique. À l'heure actuelle, l'un des écosystèmes les plus menacés de la planète est celui de la forêt atlantique (*Mata Atlântica*), un biome localisé sur la côte brésilienne (WWF, 2009, Schmitt, 2008). En raison de la déforestation et de l'agriculture intensive sur le territoire, on ne retrouve aujourd'hui que 7,84 % de sa superficie initiale (celle rencontrée avant l'arrivée des colons européens), et le gouvernement tarde à développer des outils et à mettre en place des stratégies de gestion afin d'assurer la survie de ce biome (SOS *Mata Atlântica*, 2004). La nature complexe des écosystèmes nécessite souvent l'utilisation d'indicateurs afin de vérifier leur état de santé et d'en faire le suivi. Comme les écosystèmes sont des entités dynamiques et évolutives, ce suivi doit tenir compte de la perception d'ensemble de la biodiversité ainsi que des variations spatiales et temporelles. Le choix d'un indicateur répondant à l'ensemble de ces caractéristiques devient ainsi complexe à effectuer (Noss, 1990).

À ce jour, plusieurs outils de mesure de biodiversité permettant de faire des relevés à distance ont déjà été proposés et testés. Alors que certains sont efficaces mais très coûteux, d'autres sont totalement inefficaces ou encore, ne tiennent pas compte de l'ensemble des espèces à l'étude. Tel est le cas de la télédétection numérique, qui donne un très bon aperçu de la perte de diversité végétale, mais qui ne fait qu'estimer la perte de diversité animale (Sueur et *al*, 2008). Comme la science moderne est principalement axée sur un type de signal, celui de l'image, elle tend parfois à oublier un autre type de signal très révélateur de la biodiversité animale : le son (Cornell Lab of ornithology, 2009). Ce

dernier est constamment utilisé par les animaux en tant qu'instrument de communication et, comme il est possible de séparer le son de la faune du reste de l'environnement sonore, la valeur scientifique d'un tel type de signal s'avère évidemment prometteuse.

La bioacoustique, soit l'étude des sons que produisent les animaux, représente ainsi un outil permettant d'obtenir un indicateur de la diversité animale d'un écosystème donné (Pavan, 2008). En plus d'être facile d'utilisation, peu coûteux et représentatif de la richesse spécifique, le son permet de faire le suivi de la *dynamique* de la biodiversité car elle peut être très variable en fonction de la phénologie affectant les plantes (climat, saisons) et les animaux (migrations). Comme cet indicateur, une fois filtré et analysé, permet de décrire et résumer la biodiversité à l'aide de statistiques, il permet ainsi de mieux définir les lieux prioritaires à conserver (Sueur et *al*, 2008).

Dans ce contexte, ce projet de recherche propose donc de démontrer la pertinence de la biophonie, soit les sons que produisent les animaux, en tant qu'indicateur de la biodiversité animale. L'objectif principal est de quantifier la diversité biologique d'un milieu tropical, en termes de richesse spécifique animale, à l'aide des chants produits par les oiseaux, les insectes chanteurs de même que par les anoures. Comme il sera démontré plus loin dans ce projet d'étude, le son est un indicateur répondant à l'ensemble des critères évoqués et permet un meilleur suivi de l'ensemble des espèces (Cornell Lab of ornithology, 2009).

De plus, ce projet a comme sous-objectif d'évaluer l'impact anthropique sur la biodiversité. En recueillant des échantillons sur différents territoires dont le type de gestion de la conservation varie (parc national, parc écologique, réserve de patrimoine naturel, territoire non conservé), il sera possible de comparer les aires de conservation entre elles pour ainsi quantifier l'impact de l'homme sur le milieu. Les échantillons prélevés durant différentes périodes de la journée et dans divers habitats (milieux humide, forestier, sommet, écotone et ouvert) permettront également de faire le suivi de la variabilité spatiale et temporelle de la diversité biologique tel qu'estimée par la biophonie.

# Chapitre 1. Contexte de recherche

## 1.1. Le Brésil et la *Mata Atlântica*

Le Brésil dispose d'une incroyable variété de paysages et d'écosystèmes qui regorgent d'une diversité de faune et de flore inégalée sur la planète. À lui seul, ce pays abrite entre 15 et 20 % des espèces totales retrouvées sur Terre (RBMA, 2009). En plus d'abriter la plus grande forêt tropicale, on y retrouve également la plus grande zone humide qu'est le Pantanal. Le territoire brésilien comporte un nombre supérieur d'espèces connues tant de plantes (55 000), de poissons d'eau douce (3000), d'amphibiens (675) et de mammifères (522) que n'importe où ailleurs dans le monde (WWF, 2009).

De plus, le Brésil se classe au troisième rang mondial (derrière la Colombie et le Pérou) en ce qui a trait aux espèces d'oiseaux (1700) et au cinquième rang pour les reptiles (633), sans compter les quelques 10 à 15 millions d'insectes (WWF, 2009). Or, le Brésil est reconnu pour la menace imminente pesant sur les espèces qui composent son environnement naturel. Alors que de nouvelles espèces sont découvertes, d'autres disparaissent sans cesse.

**Tableau 1.1.** Diversité des vertébrés au Brésil et dans le monde (modifié de la World Wildlife Fund, 2009).

<i>Diversité de vertébrés</i>			
	Nombre d'espèces au monde	Nombre d'espèces au Brésil	%
<b>Poissons</b>	24618	2657	10,79
<b>Amphibiens</b>	4000	675	16,88
<b>Reptiles</b>	6000	633	10,55
<b>Oiseaux</b>	9700	1677	17,29
<b>Mammifères</b>	4650	522	11,23

Cinquième pays le plus peuplé au monde (186 842 000 habitants selon la IBGE qui est l'*Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* en date du recensement de septembre 2007), le Brésil occupe ce même rang en ce qui a trait à la grandeur du pays (il vient derrière la Russie, le Canada, la Chine et les États-Unis) avec ses 8 514 877 millions de km<sup>2</sup> (IBGE, 2009).

Ses frontières touchent à tous les pays d'Amérique du Sud à l'exception de l'Équateur et du Chili. Sa topographie se résume à une très longue plaine côtière à l'est, de même que par de basses collines parfois entrecoupées par des escarpements abrupts avec quelques chaînes de montagnes telles que la *Serra do Espinhaço* et la *Serra do Mar*, qui ne dépassent que très rarement les 2000 mètres d'altitude dans le sud et le sud-est du pays (IBGE, 2009). Au cœur du Brésil, s'étend une vaste plaine, le *Planalto brasileiro*, entrecoupée de plusieurs petites montagnes ayant une hauteur moyenne d'environ 500 m. À l'exception du grand fleuve San Francisco qui se déverse dans l'Atlantique au nord de Salvador, la plupart des rivières se déversent vers le nord dans l'énorme bassin de l'Amazone (IBGE, 2009).

La répartition géographique du climat et des différentes espèces divise le pays en 6 principaux biomes, soit «de grandes unités géographiques caractérisées par des formes biologiques et des espèces, tant animales que végétales, qui y sont dominantes». Il s'agit de l'Amazonie, la Caatinga, le Cerrado, la Forêt atlantique (*Mata Atlântica*), la Pampa et le Pantanal (Figure 1.1) (IBGE, 2009).

Le biome brésilien ayant la plus grande expansion géographique est l'Amazonie, alors que le plus petit est le Pantanal. Comme l'indique le tableau 1.1, le Cerrado est le second plus grand biome derrière l'Amazonie, alors que la Mata Atlântica arrive au troisième rang devant la Pampa (IBGE, 2009).



**Figure 1.1.** Les biomes brésiliens

**Tableau 1.2.** La superficie des biomes brésiliens (modifié de SOS Mata Atlântica, 2004)

<i>Biomes brésiliens</i>	<i>Aire approximative (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Aire/Total Brésil</i>
Amazonie	4 196 943	49,29 %
Cerrado	2 036 448	23,92 %
<b>Mata Atlântica</b>	<b>1 110 182</b>	<b>13,04 %</b>
Caatinga	844 453	9,92 %
Pampa	176 496	2,07 %
Pantanal	150 355	1,76 %
<b>Aire totale Brésil</b>	<b>8 514 877</b>	

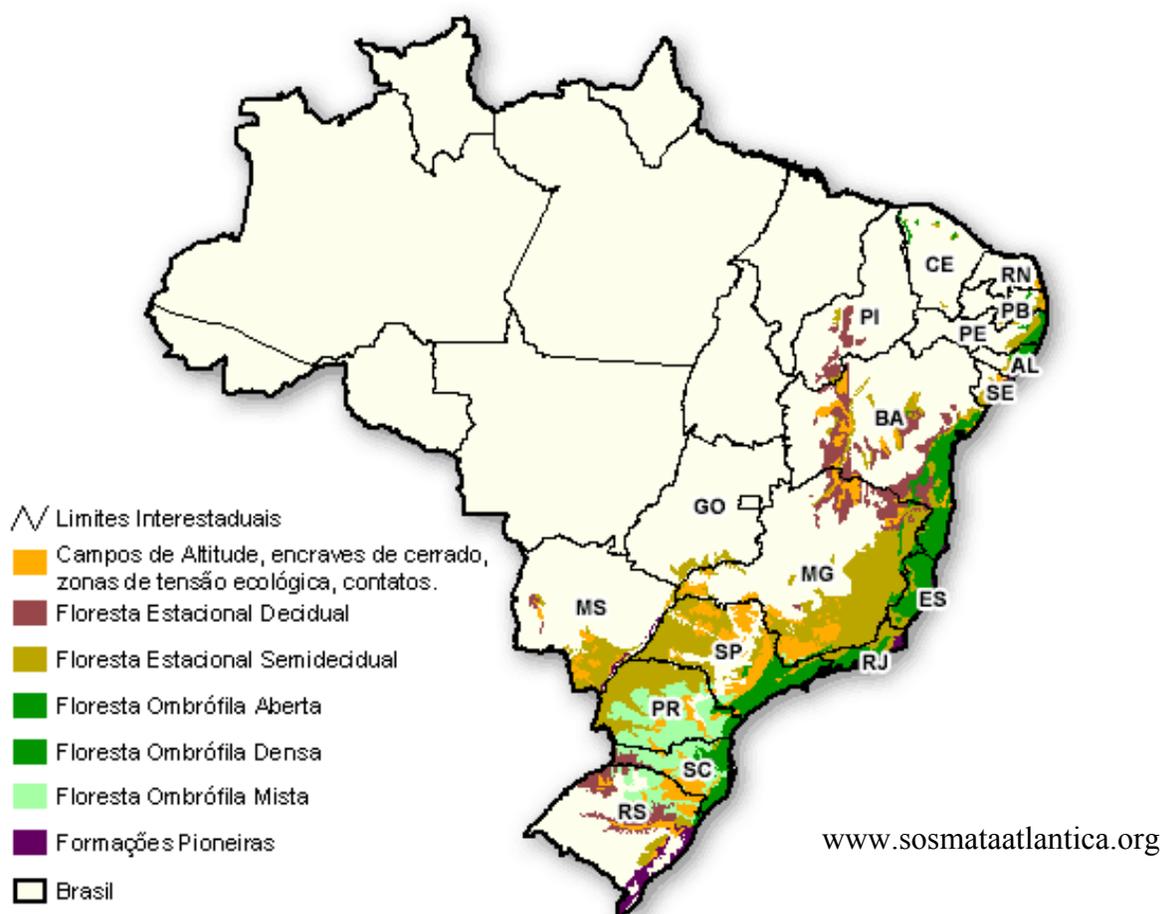
### 1.1.1. La Mata Atlântica

#### Présentation

Bien que tous les biomes du Brésil possèdent un aspect particulier et soient tous des sites prioritaires de conservation, nous avons choisi le biome de la forêt atlantique pour réaliser cette étude car sa décimation croît à un rythme très élevé. De plus, ce biome abrite la majorité des habitants du Brésil et est soumis à une grande pression par le développement des villes, et ce, malgré le fait qu'il présente un des meilleurs indices de diversité biologique de la planète (APREMAVI, 2002).

Par ailleurs, plus de 120 millions de Brésiliens vivent dans moins de 3000 villes réparties le long de l'océan Atlantique sur le vaste territoire que couvre cette forêt. Aussi, le biome de la forêt atlantique joue un rôle primordial dans le maintien de l'équilibre terrestre car il aide à réguler le climat, la température, l'humidité et les pluies (Schäffer, 2002). Sa biodiversité végétale comporte plus de 20 000 espèces de plante, ce qui en fait la forêt la plus riche au monde en espèces arboréennes par unité d'aire, avec 454 espèces/ha retrouvées au sud de Bahia (Lewinsohn et Prado, 2005).

Cette richesse spécifique a comme effet d'assurer la fertilité des sols pour ainsi accueillir les 1,6 millions d'espèces animales formées par les groupes d'insectes, mammifères, oiseaux, reptiles et amphibiens. En comparaison à l'Amazonie, la *Mata Atlântica* présente proportionnellement une plus grande diversité biologique. Dans le cas des mammifères, 218 espèces sont cataloguées dans la *Mata Atlântica* contre 353 en Amazonie; alors que l'aire de cette dernière est 4 fois plus importante que l'aire originale de la première (Morellato, 2000).



**Figure 1.2.** Représentation de la forêt atlantique et de ses différentes physionomies sur le territoire brésilien. On y retrouve en ordre de la légende les terrains en altitude et zones de tensions écologique; la forêt saisonnière décidue; la forêt saisonnière semi-décidue, la forêt ombrophile ouverte, la forêt ombrophile dense, la forêt ombrophile mixte et les formations pionnières (le jaune pâle étant des biomes autres que celui de la *Mata Atlântica*).

Troisième biome en importance au Brésil, la *Mata Atlântica* recouvre en partie ou en totalité 17 États brésiliens. Parmi ces derniers figure l'État de Santa Catarina, dont la superficie est de 95 985 km<sup>2</sup> (1,12 % du territoire brésilien) et dans lequel se déroule le présent projet d'étude. Comme l'indique le tableau 1.2, c'est aussi le troisième État

brésilien avec la plus grande aire de couverture en régénération naturelle de la forêt atlantique. (APREMAVI, 2002)

**Tableau 1.3.** Aire originale de la *Mata Atlântica* comprenant l'État de Santa Catarina dans lequel se déroule le présent projet (modifié de MMA, 2002).

<i>États brésiliens</i>	<i>Aire de l'État (Km<sup>2</sup>)</i>	<i>Aire originale (Km<sup>2</sup>)</i>	<i>Domaine actuel de la Mata Atlântica (%)</i>
AL	27 933	14 529	52,01
BA	567 295	177 924	31,36
CE	146 348	4 878	3,33
ES	46 184	46 184	100,00
GO	341 290	10 687	3,13
MS	358 159	51 536	14,39
MG	588 384	281 311	47,81
PB	56 585	6 743	11,92
PE	98 938	17 811	18,00
PI	252 379	22 907	9,08
PR	199 709	193 011	96,65
RJ	43 910	43 291	98,59
RN	53 307	3 298	26,19
RS	282 062	132 070	46,82
<b>SC</b>	<b>95 443</b>	<b>95 265</b>	<b>99,81</b>
SE	22 050	7 155	32,45
SP	248 809	197 823	79,51
<b>Total</b>	<b>3 428 783</b>	<b>1 306 421</b>	<b>38,10</b>

### **Biodiversité**

La *Mata Atlântica* est actuellement considérée comme l'un des écosystèmes les plus riches de la planète en termes de diversité végétale. Elle est composée d'une série de physionomies très diversifiées et contient près de 45 000 espèces d'angiospermes, ce qui correspond à environ 24 % de celles retrouvées sur la planète. De plus, près de 50 % des plantes vasculaires que l'on y retrouve sont endémiques. Parmi celles-ci, 53,5 % des espèces d'arbres, 65 % des espèces de palmiers et 74,4 % des espèces de broméliacées ne se retrouvent nulle part ailleurs que dans ce biome. Il en est de même pour 73 espèces de mammifères, 21 primates, 160 espèces d'oiseaux et 179 amphibiens (RBMA, 2009).

Riche en espèces endémiques (plantes, animaux, protistes, champignons, bactéries), la forêt atlantique engendre également de fortes relations écologiques telles que la symbiose, le mutualisme, la prédation et le parasitisme. L'on y retrouve également une forte dépendance de la faune en ce qui a trait à la pollinisation des fleurs et à la dispersion des graines, et la phénologie synchronisée entre les espèces permet une alimentation abondante pour la faune tout au long de l'année (APREMAVI, 2002).

Or, ce n'est qu'à la fin de la décennie 1980, après près de cinq siècles de destruction intensive, que la *Mata Atlântica* s'est vue reconnaître son importance environnementale et sociale à travers l'article 25 de la Constitution fédérale Brésilienne qui stipule que:

*«A Floresta Amazônica brasileira, a Mata Atlântica, a Serra do Mar, o Pantanal Mato-Grossense e a zona costeira são patrimônio nacional, e sua utilização for-se-à, na forma da lei, dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quanto ao uso dos recursos naturais.»* (APREMAVI, 2002)

Suite à la publication de cet article de loi, le biome de la *Mata Atlântica* fut reconnu comme une Réserve de la biosphère par l'UNESCO en date du 12 octobre 1991 (APREMAVI, 2002). Par définition, une réserve de la biosphère fait référence à «une portion d'un écosystème terrestre ou côtier qui reçoit un plan spécial de gestion et de développement durable» (APREMAVI, 2002). C'est donc un modèle de gestion intégrée, participative et durable pour des aires publiques et privées qui a comme objectif la préservation de la biodiversité, le développement durable et la recherche scientifique.

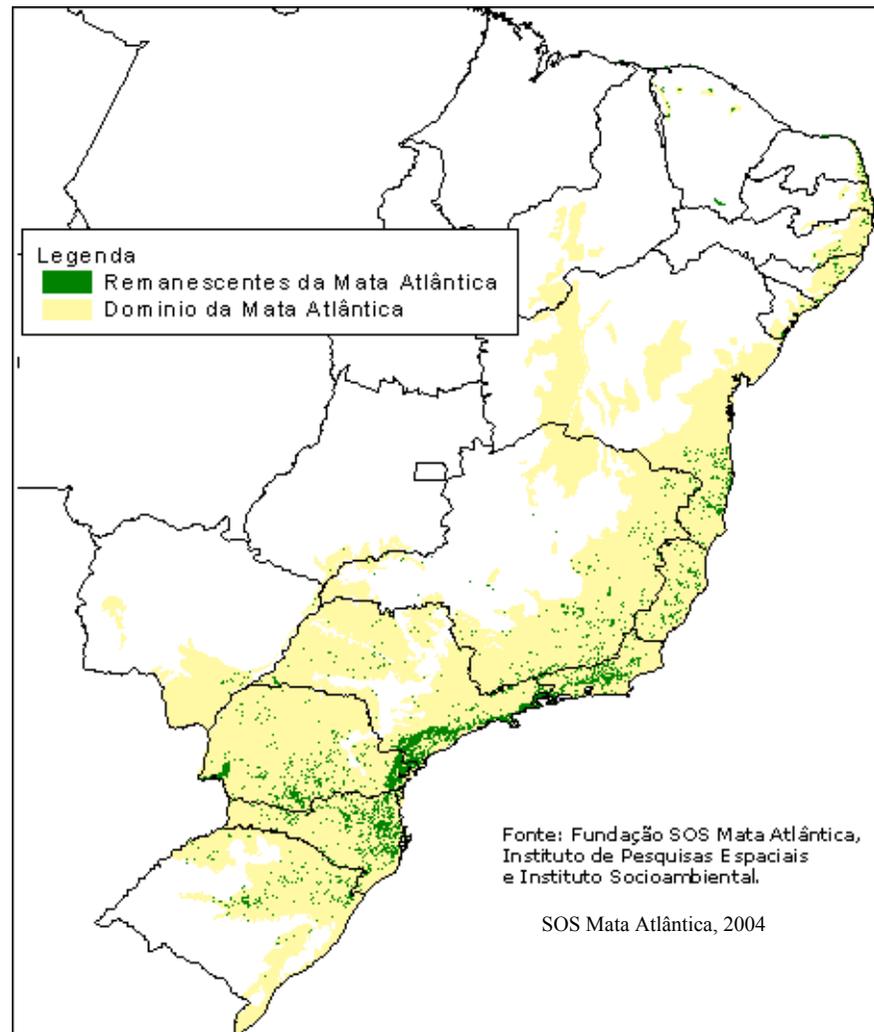
À ce jour, il en existe plus de 450 dans le monde localisées dans près de 100 différents pays (Hauselberger, 2005). Au Brésil, on retrouve les réserves de la biosphère de la *Mata Atlântica*, du *Cerrado*, du *Pantanal*, de la *Caatinga* de l'Amazonie, de la *Serra do*

*Espinhaço* et du *Cinturão Verde da Cidade de São Paulo*. Ces zones sont donc destinées à protéger la nature tout en admettant les activités économiques avec une optique de conservation (APREMAVI, 2002). Or, malgré cette reconnaissance tardive et ce plan spécial de gestion du territoire, la forêt atlantique est encore de nos jours soumise à d'importantes pressions anthropiques.

### **Pression anthropique et cycles de destruction**

Comme nous l'avons vu, la région comprise par la forêt atlantique est caractérisée par une forte occupation de population. Plus de 120 millions de personnes vivent à l'intérieur des limites de ce biome, ce qui correspond à plus de 75 % de la population brésilienne. Durant l'intervalle de 1991 à 1996, période durant laquelle le Brésil connut un accroissement important, le taux de croissance de la population fut de 1,26 % par année, alors que le taux d'urbanisation se situait autour de 83,41 % (Morellato et Haddad, 2000). Actuellement, le taux de croissance est moindre mais la côte brésilienne demeure le lieu privilégié pour l'établissement des nouveaux arrivants et il en est ainsi depuis le début de l'histoire brésilienne (IBGE, 2009).

Au cours de la dernière glaciation survenue il y a plus de 10 000 ans, le territoire de la *Mata Atlântica* s'étendait dans toute la partie est du pays sur plus de 1 306 421 km<sup>2</sup>, soit 15 % du territoire brésilien. Comme l'indique la figure 3, il ne subsiste que 102 000 km<sup>2</sup>, soit près de 7,84 % de sa superficie initiale (SOS Mata Atlântica, 2004). Bref, la forêt atlantique est le second biome le plus menacé au monde, juste derrière les forêts de Madagascar (Schmitt, 2008).



**Figure 1.3.** Aires initiales et résiduelles de la *Mata Atlântica* depuis la dernière glaciation. Comme l'indique la légende, le vert représente l'aire restante de la forêt atlantique alors qu'en jaune on retrouve l'aire initiale datant de la dernière glaciation sur le territoire brésilien.

L'année 2000 a marqué les 500 ans de la décroissance de la superficie du biome de la *Mata Atlântica*, conséquence de la colonisation européenne au Brésil. Dès leur arrivée, les colons européens exploitèrent le bois (principalement le *Pau-Brasil*), les mines d'or et de diamant, créèrent des pâturages pour le bétail, mirent sur pied des plantations de canne à sucre et de café, industrialisèrent la région et firent l'exportation du bois. Toutes ces actions eurent des répercussions telles sur la santé de l'écosystème de la *Mata Atlântica* que la forêt

ombrophile mixte, qui était prédominante sur le territoire, fut réduite à moins de 3% de son aire originale (SOS *Mata Atlântica*, 2004).

Une étude effectuée par le gouvernement de l'État du Paraná indique qu'en 1963, l'aire totale de l'état recouverte par la forêt atlantique s'élevait à 6 500 000 ha, alors qu'en 1995, elle n'était que de 1 730 500 ha, ce qui représente une diminution de 2500 km<sup>2</sup>/an (APREMAVI, 2002). Encore aujourd'hui, les causes prédominantes de la destruction de la forêt sont l'agriculture et l'élevage intensif; l'usage du feu; les cycles économiques du café de la canne à sucre, des céréales et de l'alcool; le replantage avec des espèces exotiques telles que l'Eucalyptus; la chasse et le commerce d'animaux sauvages; la spéculation immobilière; la baisse de la population rurale; la surutilisation des sols et de l'eau; la baisse de la rentabilité des produits agricoles ainsi que la pollution du sol, de l'eau et de l'air; en plus de la croissance de la production de déchets (APREMAVI, 2002).

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, moins de 5% de la forêt avait été détruite dans l'État de Santa Catarina, alors qu'aujourd'hui il ne reste que 17,46 % de la forêt originale pour une aire équivalente à 1 662 000 ha, dont 280 000 ha de forêt primaire, le reste étant de la forêt secondaire en stade de régénération médium ou avancé (APREMAVI, 2002). Malgré ce fait alarmant, les parcs nationaux et réserves municipales couvrent à peine 2 % du territoire de l'État de Santa Catarina, ce qui représente une aire insuffisante pour garantir la conservation de la biodiversité existante. Or, il existe divers types d'aire de conservation, outre les parcs nationaux et réserves fauniques, permettant ainsi de préserver la forêt (Schacht et Dallacorte, 2006).

### **Aires de protection du territoire**

Au Brésil, il existe deux types d'aires protégées : les publiques et les privées. Parmi les aires publiques, nous retrouvons les unités de protection intégrale telles que les parcs nationaux, les stations écologiques, les réserves biologiques, les monuments naturels et les refuges de vie sauvage. Toujours dans la catégorie des aires de protection publiques, l'on

retrouve également les unités de conservation durable comme les *APA (Area de Proteção Ambiental* ou aire de protection environnementale), ou encore les réserves de faune et développement durable (Schäffer, 2002). Pour les aires de protection particulières ou privées, il en existe plusieurs types mais les plus répandues sont les réserves légales, les réserves particulières de patrimoine naturel (RPPN) et les réserves naturelles. Dans l'état de Santa Catarina, 277 454 ha de forêt sont protégées par des unités de conservation intégrale, 296 942 par des aires de conservation durable alors que les RPPN protègent 10 073 ha du territoire (Schacht et Dallacorte, 2006).

### **Parc écologique**

Un parc écologique est «une aire de conservation privée gérée par le propriétaire du territoire qui fait la demande au gouvernement brésilien pour transformer son territoire en parc écologique afin d'y aménager des activités visant à l'éducation environnementale ou à la recherche scientifique» (Schäffer, 2002). Un bon exemple de parc écologique est le parc écologique de *Spitzkopf* qui fait partie de la *Serra do Mar*. Il est localisé à 15 km du centre-ville de Blumenau, SC, Brésil. Son nom lui est dû en raison du mont *Spitzkopf* (qui signifie tête pointue), plus haut sommet de la ville de Blumenau avec ses 936 m d'altitude (Schmitt, 2008).

Le parc a été créé en 1988 dans l'intention d'amasser des fonds pour maintenir l'aire de préservation de la *Mata Atlântica*. Ce sont donc 500 ha de Mata Atlântica n'ayant reçu aucune attention du Gouvernement Fédéral qui sont protégés par cette aire de conservation privée. Les fonds sont amassés sous forme d'un tarif imposé à tous les visiteurs qui désirent aller escalader le sommet ou seulement profiter des cascades localisées à l'entrée du parc. On y retrouve quelques chalets de villégiature à la base de la montagne ainsi qu'un élevage de chiens, ce qui implique un impact anthropique assez important avec la venue des voitures et de tous les visiteurs qui utilisent les sentiers

pédestres. Il demeure également quelques habitations à l'intérieur de même que des pâturages (Schacht et Dallacorte, 2006).

À ce jour, aucun inventaire faunique et floristique ne permet de témoigner du nombre d'espèces vivant à l'intérieur des limites de ce parc. Toutefois, comme il fait partie intégrante du PNSI (*Parque Nacional da Serra do Itajaí*), et que son sommet est à l'intérieur des limites de ce dernier, il possède un rôle primordial dans le maintien de la conservation de la biodiversité (Schacht et Dallacorte, 2006).

### **Réserve particulière du patrimoine naturel**

Une RPPN (*Reserva Particular do Patrimônio Natural*) est aussi une aire de conservation privée ayant comme objectif la conservation de la diversité biologique d'un lieu déterminé par son propriétaire (Heringer, 2000). La création d'une RPPN est donc un acte volontaire du propriétaire d'une aire qui décide de transformer en partie ou en totalité son territoire, et ce, sans engendrer une perte de terrain. Actuellement, le Brésil compte 524 RPPN sur son territoire pour une aire totale de 484.675,23 ha (ICMBIO, 2009).

En vertu du décret n° 98914/1990, l'IBAMA (*Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis*) il a été décidé de reconnaître ces réserves privées, à l'initiative des propriétaires, dans les zones où les caractéristiques justifient les actions de conservation, soit en raison de leurs paysages, ou encore par la présence d'espèces de faune et de flore endémiques au Brésil (IBAMA, 2009).

La création d'une RPPN représente officiellement un partenariat entre le gouvernement et le propriétaire, dans une sorte d'accord de coopération dont le principal bénéficiaire est l'environnement naturel (IBAMA, 2009). Les réserves particulières du Patrimoine naturel représentent donc une première étape pour impliquer la société civile

dans la conservation de la diversité biologique et ainsi contribuer à la protection des zones importantes des différents biomes. De ce fait, elles apportent aux générations futures les avantages du maintien de la biodiversité et, dans bien des cas, contribuent également à la protection et à la récupération de points importants (IBAMA, 2009).

### **Territoire non protégé**

La grande majorité du territoire brésilien appartient à l'État et n'est soumis à aucun type de préservation que ce soit (MMA, 1996). Or, il est tout de même important de faire un suivi de ces régions car elles comportent tout autant, sinon parfois plus de biodiversité que les zones conservées intégralement ou sous le principe du développement durable. Un exemple de territoire non protégé et à proximité d'une zone de conservation est la *Pousada Rio da Prata*, site d'hébergement touristique localisée à 17 km de la municipalité de Blumenau dans la région de *Nova Rússia* et à 5 km du parc national de la *Serra do Itajaí*. Le nom de l'auberge localisée en zone rurale provient du nom de la rivière transportant du minerai au début du XXe siècle, période au cours de laquelle la région a également subi de lourdes exploitations forestières et minières. Avec le temps, les opérations ont cessé suite à une prise de conscience de l'importance de la biodiversité et a conduit à la préservation de la forêt atlantique. De nos jours, seuls les tunnels des mines d'argent sont encore exploités à des fins touristiques. Or, ce site est un lieu fortement anthropisé en raison des nombreux visiteurs, de l'agriculture et de la construction de nouvelles bâtisses et ce, malgré les interdictions émises par le gouvernement (MMA, 2002).

En dépit de toutes les mesures prises par le gouvernement brésilien et de la population pour assurer la conservation de la forêt atlantique, il est important de faire le suivi des espèces, tant animales que végétales. La perte de biodiversité ayant grandement accéléré au cours des deux derniers siècles suite aux conséquences directes et indirectes de la croissance démographique et des changements climatiques, il devient primordial de trouver un outil capable de faire le suivi des espèces (PNUE, 2007). Les propos tenus lors du Sommet Mondial sur le Développement Durable (Johannesburg, 2002) font d'ailleurs

mention de l'urgent besoin de mettre sur pied des méthodes efficaces de suivi des espèces en vue d'atteindre les objectifs visés de réduction significative de perte de diversité biologique (ONU, 2002).

## 1.2. Indicateur de biodiversité : la bioacoustique

Le changement de la diversité biologique est un paramètre sensible révélant la santé d'un écosystème. Ainsi, il est important d'en faire le suivi tant dans les petits habitats qu'à l'échelle d'une région écologique entière, car la biodiversité réagit tant à des perturbations locales qu'à des changements globaux de la qualité de l'environnement (Eldridge, 1998).

Traditionnellement, la biodiversité a été évaluée au moyen d'enquêtes sur les composantes des différents royaumes biologiques dans des secteurs spécifiques. Or, ces évaluations étaient rarement répétées et considérées comme permanentes, alors que la biodiversité varie selon différents facteurs au cours d'une période de temps donnée et selon les différents milieux où elle est enregistrée (Green, 2005). Les écosystèmes étant des entités dynamiques dans le temps et l'espace, la biodiversité devrait également refléter cette évolution (Loh, 2005). L'importance de faire le suivi des espèces a donc amené plusieurs organisations internationales à s'impliquer dans le développement d'indicateurs. Par exemple, des organismes tels que le Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique, le Programme des Nations Unies sur l'Environnement (PNUE), la Banque Mondiale et *Birdlife International* ont tenté de définir un bon indicateur et d'en énumérer les caractéristiques. Parmi celles proposées, les définitions retenues et utilisées ont été celles lancées par *The European Environment Agency's* (2005), qui définit l'indicateur comme : « une mesure, généralement quantitative, pouvant être utilisée pour illustrer et communiquer des phénomènes complexes simplement, incluant leurs tendances et leur évolution » (Donnelly, 2006).

De leur côté, *The US Environmental Agency* en collaboration avec *The US Geological Survey* définissent un indicateur environnemental comme : « une caractéristique

mesurable fournissant des éléments scientifiquement vérifiables de la qualité de l'environnement et des écosystèmes » (Donnelly, 2006).

Le choix d'un indicateur relevant de l'ensemble des caractéristiques spatiales et temporelles influencées par la dynamique de la biodiversité devient donc primordial, quoique difficile à effectuer. Conséquemment, afin de mesurer l'ensemble de la dynamique des écosystèmes, l'indicateur doit être **1)** suffisamment sensible pour fournir une alerte rapide en cas de changement, **2)** réparti sur une vaste zone géographique ou largement applicable, **3)** capable de fournir une évaluation continue sur un large éventail de stress, **4)** relativement indépendant de la taille de l'échantillon, **5)** facile et peu coûteux d'utilisation, **6)** capable de faire la distinction entre les cycles naturels et ceux induits par le stress d'origine anthropique, ainsi **7)** qu'utilisable à des phénomènes importants sur le plan écologique (NOSS, 1990, Gregory *et al.* 2005, Donnelly *et al.* 2006).

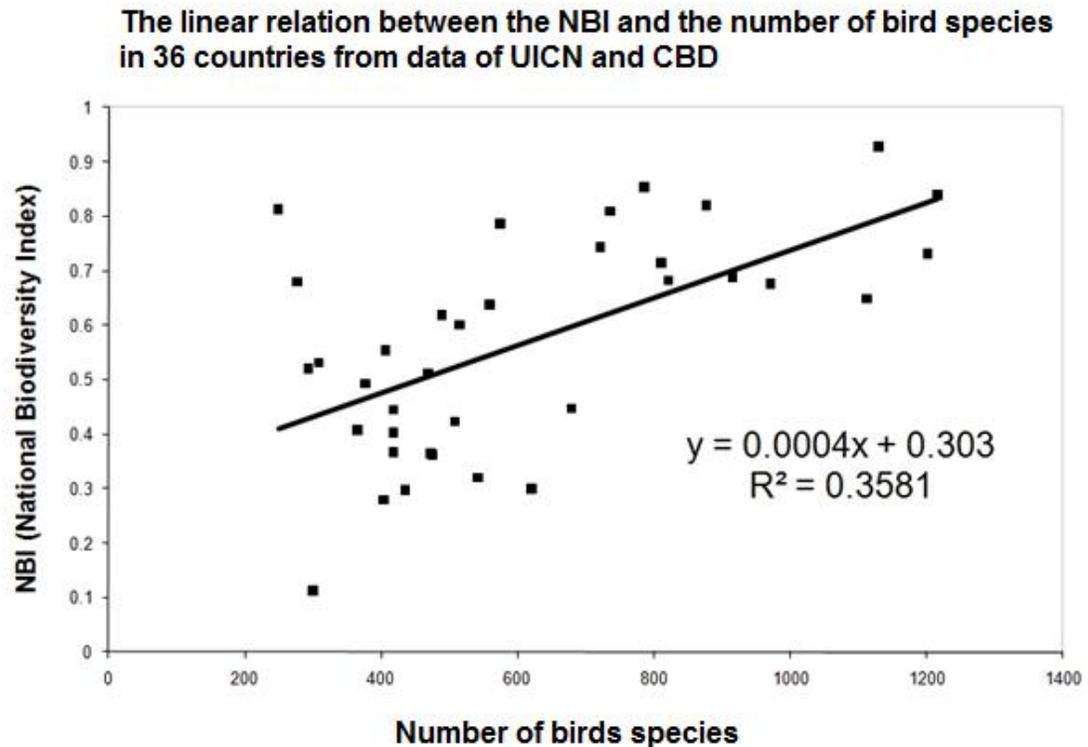
À ce jour, plusieurs indicateurs ont été proposés par la communauté scientifique et l'utilisation de capteurs à distance semble être l'une des solutions actuelles à ce problème de gestion. Alors que la télédétection peut, par exemple, être employée pour suivre la phénologie du couvert végétal, les images prises lors des différentes saisons peuvent nous permettre de voir l'évolution des populations végétales. Or, ces images ne nous donnent aucune information sur l'évolution des espèces animales retrouvées dans ces milieux (Cornell Lab of ornithology, 2009). Pourtant, la menace qui repose sur le règne animal n'est pas à négliger et son suivi est tout aussi important pour le maintien d'un équilibre au sein des écosystèmes naturels et humains.

Un autre type de signal, le son, est donc considéré depuis quelques années dans le domaine de l'écologie acoustique (Pavan, 2008). Utilisé par une grande majorité d'espèces animales tant pour la communication, la reproduction ou encore pour signaler une menace, le son est d'une importance capitale pour la survie des espèces. En nous penchant sur les différents critères d'un bon indicateur évoqués par Noss (1990) et par différents auteurs, nous voyons que le son, et plus précisément les chants d'oiseaux, d'insectes et d'anoures, représentent un excellent outil permettant de faire le suivi de la diversité spécifique animale (Cornell Lab of ornithology, 2009).

### 1.2.1. Oiseaux en tant qu'indicateur

Les oiseaux sont relativement faciles à détecter, identifier et recenser (Domalin, 2007). Leur taxonomie est bien résolue et le degré de connaissances scientifiques sur les oiseaux est relativement élevé par rapport à d'autres espèces. De plus, les oiseaux possèdent un grand éventail d'habitats en nature; on les retrouve notamment sur les sommets de montagne, près des milieux humides, des écotones et tant dans les milieux urbanisés que forestiers. Ils possèdent une durée de vie élevée. La longévité des oiseaux est très variable selon les espèces ; elle peut varier de trois ou quatre ans pour certains passereaux, à plus de 50 pour les albatros et puffins, et même jusqu'à plus de 100 ans pour certaines espèces de perroquets (Domalin, 2007).

Toutes ces caractéristiques font des oiseaux d'excellents indicateurs de changements environnementaux et permettent le suivi à différentes échelles. Il existe également des situations pour lesquelles la population d'oiseaux peut être associée à la dégradation de l'environnement (par exemple, la réponse des oiseaux vivants en milieux humides suite à l'eutrophisation des lacs ou encore la réaction des oiseaux marins face à la surpêche) (Gregory, 2005). Selon Carignan & Villard (2000), les oiseaux répondent aux changements environnementaux à plusieurs échelles. Ils sont également bien adaptés pour le suivi car **1)** ils avertissent de leur présence par la vocalisation **2)** ils peuvent être recensés de manières efficaces sur de grandes échelles spatiales, et **3)** leur présence, leur abondance et leur succès de reproduction se sont révélés être influencés par la nature et la configuration des habitats environnants (Carignan & Villard, 2002). Ils sont également très influents auprès du public et des autorités gouvernementales. De plus, une étude faite par l'Union internationale de la conservation de la nature (UICN, 2004) indique qu'il existe une relation linéaire ( $R^2 = 0.3581$ ) entre l'indice national de biodiversité et le nombre d'espèces d'oiseaux (Figure 1.4.).



**Figure 1.4.** Relation linéaire entre l'indice national de la biodiversité de plusieurs pays et le nombre d'espèces d'oiseaux de ces mêmes pays

Or, bien qu'ils soient très représentatifs de la santé des écosystèmes, les oiseaux ne représentent pas l'ensemble de la biodiversité et c'est pourquoi nous ferons également le suivi des sons émis par les insectes et les anoures. Ces derniers font d'ailleurs l'objet de nombreuses recherches récentes effectuées dans le domaine de la bioacoustique.

Par définition, la bioacoustique est une ramification de la zoologie strictement liée à l'éthologie, et étudie la réception ainsi que la production sonore chez l'animal, y compris l'Homme, ainsi que les différentes méthodes de communication sonore chez les animaux (Pavan, 2008). De plus, la bioacoustique étudie les organes de la production et de la réception du son, de même que les processus physiologiques et neurologiques impliqués dans la transmission des sons. Enfin, cette discipline tente également de comprendre les relations entre les caractéristiques acoustiques produites par les animaux et la nature de

l'environnement dans lequel ils se retrouvent (Pavan, 2008). À l'échelle de l'écosystème, la bioacoustique peut être employée à des fins de comparaison ou de suivi, mais cette approche n'est encore qu'à ses débuts.

### 1.2.2. Historique de la bioacoustique

Bien que les méthodes pour capter les sons existent déjà depuis les années 1900, voir même 1800, la discipline de la bioacoustique ne s'est développée qu'après la seconde partie du XXe siècle. Plus précisément, les premiers enregistrements d'oiseaux sauvages ont probablement été ceux captés par Cherry Kearton, l'un des premiers photographes de vie sauvage, en Angleterre aux alentours de 1900. Ce dernier effectuait une étude sur la grive musicienne (*Turdus philomelos*) ainsi que sur le rossignol philomèle (*Luscinia megarhynchos*) (Ranft, 2004).

En Amérique, les premiers enregistrements d'oiseaux sauvages ont été faits en vue d'une trame sonore pour un film et ont été réalisés par Peter Kellogg et Arthur Allen en 1929, alors que dans la région australienne ils ont été publiés sur un disque 78 rpm en 1931, disque sur lequel on peut entendre le chant d'un ménure superbe (*Menura novaehollandiae*). Les premiers enregistrements systématiques de sons d'animaux datent de 1950 alors que Kellogg et Allen formaient la base de ce qu'est aujourd'hui la Librairie Macaulay des Sons Naturels de l'Université de Cornell aux États-Unis (Ranft, 2004). Les principales utilisations des collections d'archives sonores sont la science, la conservation de la nature, l'éducation et le divertissement. Les utilisations en science se résument à la description, la comparaison, l'analyse de sons en vue de l'identification des espèces, populations et individus ou encore afin d'obtenir des indicateurs de biodiversité (Ranft, 2004).

À ce jour, la plus grande bibliothèque d'archives de sons naturels contient plus de 500 000 échantillons de sons et la majorité de ces derniers ont été enregistrés au cours des cinquante dernières années. Malgré l'histoire relativement récente de la récolte de sons

d'animaux, il a été estimé qu'en 1965, près de 25 % des 10 000 espèces d'oiseaux du monde entier ont été enregistrées. En 1982, cette proportion a atteint 50 % pour augmenter à plus de 90 % en 2002. (Ranft 2004, Carignan & Villard, 2002). Actuellement, les scientifiques en sont à découvrir de nouvelles espèces à l'aide de ce médium.

**Tableau 1.4.** Principales collections d'archives de sons (modifié de Ranft, 2004).

<b>Librairie de sons</b>	<b>Année d'établissement</b>	<b>Nombre d'enregistrements</b>
Macaulay Library of Natural Sounds, Ithaca, USA	1956	150 000
The British Library Sound Archive, London, UK	1969	140 000
Tierstimmenarchiv, Berlin, Germany	1952	100 000
Fitzpatrick Bird Communication Library, Pretoria, South Africa	1979	30 000
Australian National Wildlife Collection, Lyneham, Australia	1961	25 000
Arquivo Sonoro Neotropical, Sao Paulo, Brazil	1978	25 000
Borror Laboratory of Bioacoustics, Ohio, USA	1945	24 000
Florida Museum of Natural History, Florida, USA	1973	15 000

Au cours de la réalisation des premiers projets de recherche en bioacoustique, ce sont en grande partie les limites d'ordre technologique (taille des appareils d'enregistrement et de stockage, de même que leur fragilité) qui ont freiné les travaux de terrain (Pavan, 2008). Or, les évolutions technologique des dernières années (accompagnée de la miniaturisation des équipements) ont ouvert de nouveaux horizons pour la discipline de la bioacoustique, de sorte qu'aujourd'hui, il est facile et peu coûteux d'obtenir un équipement de base pour la recherche acoustique, de même que de puissants ordinateurs portables équipés de logiciels et de programmes de traitement des sons à la fine pointe du marché (Pavan, 2008). Cette révolution a donc permis d'échantillonner, d'analyser et de

stocker beaucoup plus facilement les sons animaux et ainsi agrandir la collection des sons animaux.

À l'heure actuelle, le son est plutôt utilisé dans les domaines de l'écologie et de la biologie pour l'étude de l'éthologie, c'est-à-dire du comportement animal. Le *Cornell Lab of ornithology* de l'Université Cornell (Ithaca, USA) est l'un des laboratoires spécialisés dans ce domaine de recherche, principalement à ce qui a trait aux oiseaux, aux baleines et aux éléphants (Cornell Lab of ornithology, 2009). Or, des travaux de toutes sortes sont actuellement réalisés dans le domaine de la bioacoustique.

### **1.2.3. Les applications de la bioacoustique**

#### **Acoustique sous-marine**

La discipline de l'acoustique sous-marine étudie le comportement des animaux aquatiques de même que les caractéristiques acoustiques de l'environnement sous-marin dans lequel ils se trouvent. Dans l'environnement acoustique sous-marin, la communication joue un rôle crucial: la vitesse de propagation élevée (environ 1500 m / sec, soit cinq fois plus importante que dans l'air) et la faible atténuation avec la distance permettent une transmission efficace des signaux acoustiques (Pavan, 2008).

#### **Outil de taxonomie**

La collecte des enregistrements sonores d'animaux est reconnue comme étant un outil précieux pour la taxonomie de la biodiversité (Pavan, 2008; Cornell Lab of ornithology, 2009; Ranft, 2004). Les scientifiques sont maintenant capables d'identifier des animaux dans une forêt dense et à une grande distance grâce à un moyen non-couteux et précis lorsque l'identification visuelle devient impossible. Les enregistrements sonores sont donc davantage utilisés à des fins d'identification des espèces et sont appliqués à des groupes taxonomiques bien connus tels que les oiseaux et les mammifères. Or, les récentes applications sont également utilisées sur des groupes moins étudiés tels que les insectes (Pavan, 2008).

Les données bioacoustiques peuvent être utilisées en taxonomie afin de caractériser, en complémentarité avec d'autres données morphologiques ou moléculaires, les espèces. Plusieurs nouvelles espèces ont d'ailleurs été répertoriées par leur vocalisation, soit parce qu'il était difficile de les localiser par le visuel ou encore parce qu'on les croyait appartenir à un autre groupe en raison de leurs similarités morphologiques. Les travaux poursuivis par David Chesmore (Chesmore, 2004) font état de la méthodologie utilisée lors de l'identification acoustique des espèces d'insectes dans leur milieu naturel, et ce, malgré les interférences présentes dans le milieu.

À ce sujet, le son dénote plusieurs avantages au profit de l'image lorsque vient le temps d'identifier des espèces, en milieu tropical, du moins. Parce que plus de 90 % des contacts sont seulement auditifs en forêt tropicale, dû à la densité de la forêt, le chercheur doit être bien entraîné pour reconnaître chaque chant de chaque espèce présente. Une identification douteuse pourrait alors modifier les résultats, non seulement pour cause d'une erreur sur l'espèce entendue, mais également parce que le chercheur risque de ne pas entendre l'ensemble des espèces au cours de son écoute (Viellard, 2000).

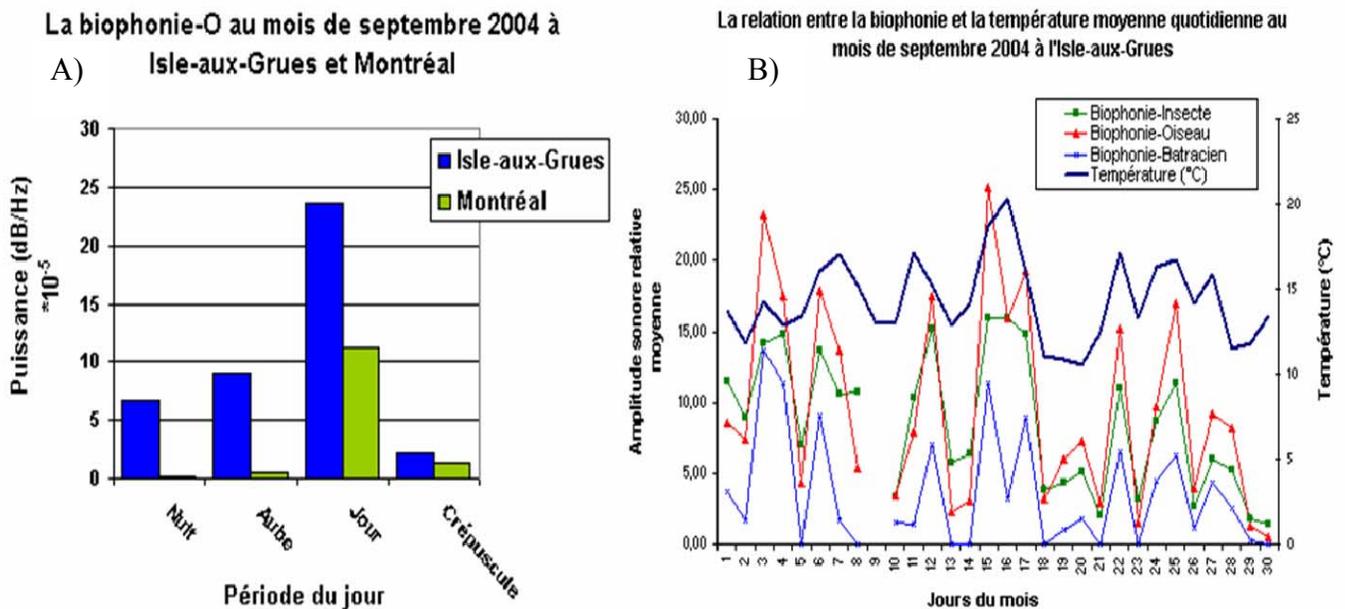
Le professeur et ornithologue Jacques Viellard travaille d'ailleurs actuellement en forêt amazonienne au Brésil sur l'identification des différentes espèces par leur signature spectrale. Il a d'ailleurs identifié et enregistré une bonne partie des espèces d'oiseaux que l'on retrouve en Amazonie et est à l'origine de plusieurs articles concernant la méthodologie qu'il utilise (Viellard, 2000). Cette méthodologie, soit la *Point count method* qui consiste à enregistrer l'ensemble des espèces d'oiseaux (ou autres chants) durant une période de temps spécifique et à des endroits déterminés, permet donc d'enregistrer la signature spectrale de chaque espèce d'oiseau pour les reconnaître automatiquement par la suite. Les avantages de cette méthode sont nombreux; elle permet de s'ajuster facilement aux conditions locales (évite aux observateurs de s'écarter des sentiers pour observer les oiseaux et diminue ainsi les risques de se perdre en forêt lors de l'identification), en plus de permettre la répétition des enregistrements afin d'obtenir un nombre suffisant d'échantillons pour ainsi diminuer les risques d'erreur (Viellard, 2000).

Un autre avantage majeur mentionné par Viellard est que, puisque les espèces d'oiseaux démontrent un rythme diachronique dans leurs activités (phénomène de chœur, migration), tant au cours de la journée qu'entre les saisons, il est possible d'obtenir des échantillons pour chacune des périodes de la journée et de l'année. Alors qu'un spécialiste sur le terrain fait un inventaire à un moment précis de la journée et à une date fixe, les enregistrements de chants peuvent se répéter plusieurs fois par jour et à chaque jour de l'année. Selon la méthodologie employée par Viellard, il est possible de prendre jusqu'à 5 ou 6 échantillons au cours de la même matinée (Viellard, 2000). La majorité des recherches effectuées en milieu tropical portent d'ailleurs sur ce même type de travaux qui consiste en l'identification des espèces par le son. Bien que cette branche de la bioacoustique soit très intéressante, ce ne sont pas les objectifs visés par le projet de recherche proposé ici.

### **Écologie acoustique**

L'écologie acoustique est une branche de l'acoustique qui étudie les relations sonores entre l'animal et son environnement. Dans ce domaine, le paysage sonore de même que la biodiversité sont les thèmes soulevés (Pavan, 2008). Les travaux réalisés en écologie acoustique tentent de lier la biophonie à la biodiversité dans des objectifs ultimes de conservation et de suivi des espèces. Dans le domaine du suivi environnemental, le *Computational Ecology and Visualisation Laboratory* (CEVL) et le *Remote Environmental Assessment Laboratory* (REAL) de la *Michigan State University* ont réalisé une série de travaux permettant d'utiliser le son comme indicateur de la santé d'un écosystème. Par exemple, une étude de Laporte (2005), démontre qu'il est possible d'utiliser le son pour obtenir un estimé instantané de la biodiversité animale à un endroit et un moment choisi et de faire le suivi temporel de cette biodiversité.

Pour ce faire, deux stations d'enregistrement ont été installées, l'une en milieu urbain (l'île de Montréal) et l'autre en milieu rural (l'Isle-aux-Grues). Au cours de ce projet, la biophonie, soit les intervalles de fréquence correspondant aux insectes, batraciens et oiseaux, a été enregistrée, traitée et analysée pour les deux stations et ce, pour une période de temps prédéterminée. Les résultats de la recherche ont montré que l'intensité de la biophonie correspondant aux oiseaux durant le crépuscule était deux fois plus importante à Isle-aux-Grues qu'à Montréal (Laporte, 2005). Dans un deuxième temps, les séries temporelles ont montré que les événements de biophonie enregistrés sont significativement corrélés avec les fluctuations de température au mois de septembre ( $\alpha \leq 0,05$ ,  $r_{s \alpha/2} = 0,37$ ,  $r_{s(\text{biophonie-oiseau})} = 0,60$ ,  $r_{s(\text{biophonie-insecte})} = 0,65$  et  $r_{s(\text{biophonie-batracien})} = 0,50$ ). De plus, les résultats démontrent que la tendance linéaire correspondante à la biophonie des insectes est fortement corrélée à la diminution de la longueur de la journée ( $\alpha \leq 0,05$ ,  $r_{s \alpha/2} = 0,37$  et  $r_{s(\text{biophonie-insecte})} = 0,55$ ) (Laporte, 2005).



**Figure 1.5.** A) La biophonie Oiseaux à IAG et à MTL en septembre 2004. (Laporte, 2005). B) La température moyenne quotidienne et les biophonies O-I-B à l'Isle aux-Grues au mois de septembre (Laporte, 2005).

La méthodologie employée lors des travaux de Gage et Laporte (Gage, 2005 et Laporte, 2005) sera sensiblement la même méthode utilisée pour la réalisation de ce présent projet. Cette méthode, soit l'analyse du signal direct qui est à l'origine une analyse basée

sur les statistiques (Hopp *et al.* 1998) est donc éprouvée et testée en milieu boréal. La méthode de l'analyse direct du signal s'effectue à l'aide d'un programme, baptisé *Biophonie*©, qui a été développé dans le logiciel MATLAB v.7.0. Cette analyse consiste à calculer la distribution de la puissance (dB/Hz) au sein du spectre du signal sonore et à extraire de cette distribution les valeurs de puissance correspondant aux intervalles des fréquences des différentes biophonies. Pour ce faire, la densité spectrale de puissance (DSP) est calculée pour chaque échantillon (Gage, 2005 et Laporte, 2005).

Les objectifs du projet de recherche proposé ici vont dans le même sens que les travaux de Gage et Laporte mais il s'agit d'une première en milieu tropical. Nous ne savons donc pas si la méthode éprouvée et testée en milieu boréal sera efficace dans le bassin d'espèces animales du biome de la *Mata Atlântica*.

### **Publications et congrès**

*Bioacoustics, The International Journal of Animals Sound and its Recording*, est l'une des rares revues internationales dédiées à l'étude des sons que produisent les animaux. Cette revue scientifique a pour mandat de publier des travaux réalisés dans le domaine de la bioacoustique et l'on y retrouve, entre autres, différentes recherches effectuées en bioacoustique marine. Toutefois, la revue contient principalement des travaux sur le suivi des espèces par le son. C'est d'ailleurs l'un des principaux attraits de la discipline qui s'attarde à identifier chacune des espèces par leur signature spectrale afin de les reconnaître électroniquement par la suite.

De surcroît, il existe un Conseil d'experts, *The International Bioacoustics Council* (IBAC), se rassemblant chaque deux ans afin de faire état des avancées dans le domaine. L'IBAC a été fondé en septembre 1969 au Danemark et a comme objectifs de promouvoir la participation internationale en bioacoustique et de développer de nouvelles technologies. Depuis sa mise sur pied, la principale réalisation du Conseil a été l'organisation de multiples congrès et colloques dans plus de 12 différents pays animés par des scientifiques venant de tous les continents (IBAC, 2009).

La bioacoustique est une discipline relativement récente, au sens où la nouvelle technologie permet dorénavant d'obtenir davantage d'échantillons et d'approfondir les analyses du signal. Or, la technologie n'est pas la seule clé qui fait d'un chercheur un bon bio-acousticien. Ce dernier doit détenir certaines notions sur le signal sonore et la communication animale afin de bien pouvoir orienter ses recherches (Pavan, 2008).

### **1.3. Le signal sonore et la communication animale**

L'Homme a toujours été émerveillé par le spectacle que peuvent offrir les animaux. Que ce soit l'observation de leurs attitudes, odeurs, mouvements ou encore par leurs chants, les comportements animaux captivent, encore de nos jours, un très large public. Comme les signaux sonores sont utilisés dans de nombreuses situations (ils expriment par exemple l'alarme, la possession d'un territoire, la détresse, le chant d'amour), il devient intéressant de s'y attarder pour ainsi mieux comprendre les comportements animaux pour ainsi faciliter le suivi des espèces (Palais de la découverte, 2009).

#### **1.3.1. Principes de base du signal sonore**

Au cours d'une communication acoustique, le transfert d'information depuis l'animal émetteur jusqu'à l'animal récepteur est tributaire de la propagation du son (Mathevon, 1996). Par définition, le son est «une vibration ou une onde de molécules d'air résultant du mouvement d'un objet et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant» (Musée des sciences et de la technologie du Canada, 2010). Sans mouvement, il n'y aurait donc aucun

Schéma récapitulatif des fonctions du chant



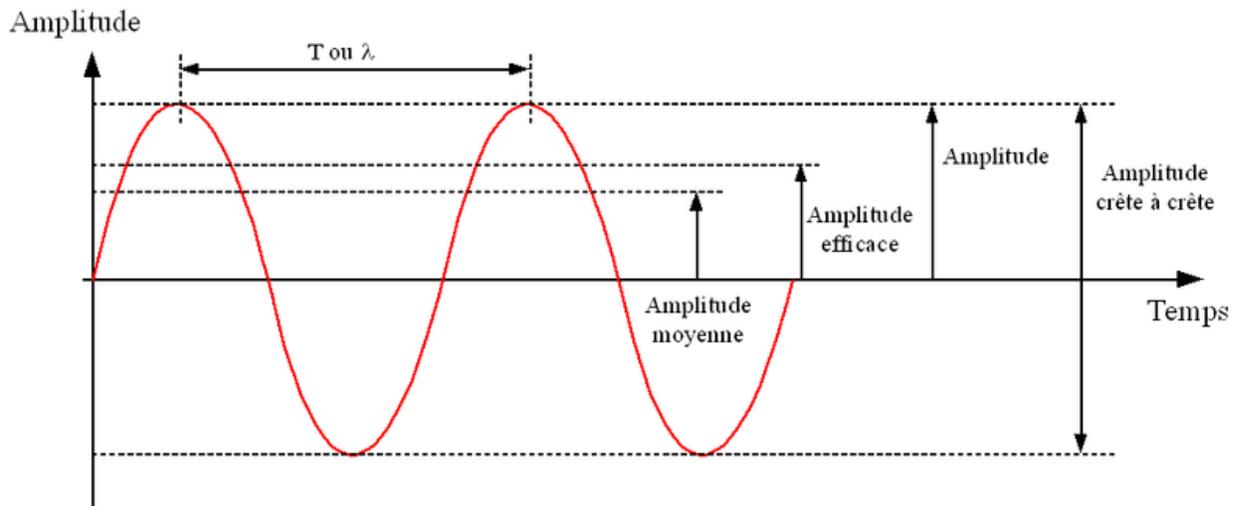
Schéma 4 : BERREZAY (2005)

Figure 1.6. Schéma récapitulatif des différentes fonctions du chant

son. Dans un milieu compressible tel que l'air sec, le son se propage (à une vitesse de 1200 km/h à 0°C, soit 331,6m/s) sous forme d'une variation de pression créée par la source sonore.

Dans le domaine de la bioacoustique, le signal sonore se définit comme une « onde sinusoïdale qui se propage dans le but de rendre effective la communication entre un émetteur et un récepteur. » (Bradbury, 1998). Il se caractérise par trois éléments clés que sont l'amplitude, la fréquence et la durée (Brumm, 2004).

L'amplitude est «une mesure de l'ampleur de l'oscillation d'une onde» et, dans le domaine de l'acoustique, elle est généralement mesurée et exprimée en décibel (dB) (Brandbury, 1998).



**Figure 1.7.** Amplitude (correspond à la distance entre le maximum de l'onde et l'axe horizontal, alors que la longueur d'onde correspond à la distance entre deux sommets) (Musée des sciences et de la technologie du Canada, 2010).

Les vibrations peuvent comprimer très fortement ou très faiblement les molécules d'air. Ainsi plus un objet est comprimé pour le faire vibrer, plus les vibrations induites sont grandes et plus le son est fort ou encore, plus l'amplitude est grande (Brumm, 2004).

Pour sa part, la fréquence se mesure en cycle par seconde ou en Hertz (nom provenant du physicien allemand ayant mené des expériences sur le son au 19<sup>e</sup> siècle), et est déterminée par sa longueur d'onde de même que par sa période (temps nécessaire au passage d'une longueur d'onde) (Bradbury, 1998). La fréquence correspond donc au nombre de cycles par seconde d'une onde donnée et elle représente l'inverse de la période (Truax, 1999). Ainsi, lorsqu'on dessine une onde sonore, les crêtes et les creux de cette dernière peuvent être rapprochés ou éloignés les un des autres car les ondes sonores se déplacent dans l'air et vibrent à différentes vitesses ou «fréquences». Ainsi, plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse et résulte en un bruit grave car le nombre de cycles par seconde est diminué (440 vibrations par seconde correspondent à 440

Hertz). La fréquence d'un son est directement liée à la hauteur d'un son perçu, mais n'en est qu'une des composantes : à une fréquence faible correspond un son grave, à une fréquence élevée un son aigu du spectre sonore (Musée des sciences et de la technologie du Canada, 2010).

Les êtres vivants ne peuvent percevoir qu'une partie du spectre sonore. Les physiologistes ont démontré que l'oreille humaine moyenne ne perçoit que les sons au-dessus de 16 Hz (en dessous les sons sont qualifiés d'infrasons) et en deçà de 20 kHz (au-delà les sons sont des ultrasons). Le chat peut, quant à lui, percevoir des sons allant jusqu'à 25 kHz, les chiens jusqu'à 35 kHz, alors que les chauves-souris et les dauphins peuvent percevoir les sons de fréquence 100 kHz (Truax 1999). Pour ce qui est de l'oreille des oiseaux, elle supplante la nôtre, car des derniers sont capables de distinguer une multitude de sons confondus par l'oreille humaine. Si pour l'oreille humaine un intervalle minimum de 25 millisecondes est nécessaire pour distinguer deux sons successifs perçus séparément, pour l'oiseau, cet intervalle est de l'ordre de la milliseconde (Musée des sciences et de la technologie du Canada, 2010).

La troisième composante importante du signal sonore étudiée en bioacoustique est la durée, caractéristique permettant de définir le chant d'une espèce. En effet, lorsque combinée à l'amplitude, la durée (souvent exprimée en seconde ou milliseconde) permet de décrire l'enveloppe d'un signal sonore et devient ainsi un outil employé pour caractériser les signaux produits par les animaux (Brumm, 2004).

Les signaux acoustiques des oiseaux et des autres animaux sont donc caractérisés par leur hauteur (déterminée par la fréquence de vibration), leur timbre, leur intensité (mesurée par l'amplitude de la vibration), de même que par leur organisation rythmique et mélodique. (Domalin, 2007). Autrement dit, chaque animal possède sa propre signature sonore comme peut l'être une empreinte digitale. À titre d'exemple, le colibri à gorge bleu (*Lampornis clemenciae*), retrouvé dans le sud des États-Unis, utilise l'intervalle de fréquence entre 5,5-6,9 kHz pour son cri territorial d'une durée de 0,25 seconde, alors que la rainette crucifer (*Pseudacris crucifer*) de l'Est de l'Amérique du Nord utilise les fréquences entre 2,5 et 3,2 kHz en émettant deux pulsations en 0,1 seconde (Parris 2002).

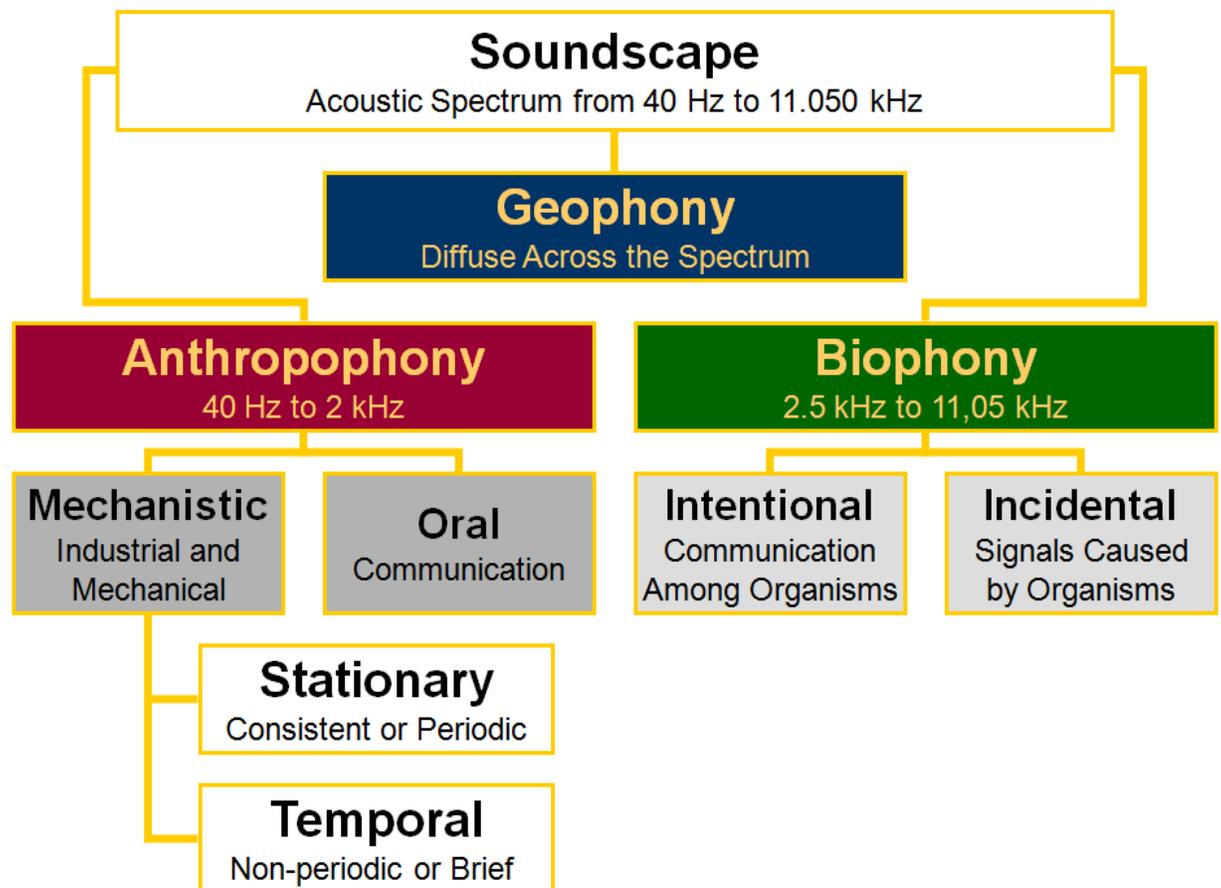
Bref, il existe autant de signaux différents que d'espèces et même d'individus. C'est donc pourquoi, dans un souci de classification des sons produits par les différentes espèces animales, que Stuart Gage et son équipe de la *Michigan University* (Gage *et al.* 2005) ont répertorié les signaux sonores de plus de 256 espèces d'oiseaux, 52 espèces d'insectes et 42 espèces d'amphibiens de l'Amérique du Nord, afin de déterminer les fréquences utilisées par chacun de ces groupes. Ils ont obtenu comme résultats que la bande de fréquence la plus utilisée par les oiseaux est de 4-5 kHz, de 6-7 kHz par les insectes et de 1-2 kHz par les amphibiens (Laporte, 2005)

### **1.3.2. Le paysage sonore**

En plus de produire des signaux sonores propres à leurs espèces, les animaux perçoivent des sons dans un intervalle de fréquence donné car leur appareil auditif est sensible à certains signaux sonores seulement et ce, dans certaines conditions données puisque le paysage sonore se divise en plusieurs composantes (Brabury *et al.* 1998). De ce fait, une corrélation positive a été démontrée entre la composition des espèces animales d'un écosystème et la structure sonore de ce même lieu (Gage *et al.* 2003). La sonosphère, soit la portion de la biosphère dans laquelle les sons occurrent, est composée du paysage sonore (*soundscape*), qui à son tour est divisé en trois composantes importantes. Il s'agit de la biophonie, de la géophonie et de l'anthropophonie, nommés ainsi en fonction de l'origine de leur source sonore et différenciées les unes des autres par leur intervalle de fréquence (Gage *et al.* 2005).

La biophonie regroupe les sons produits par les organismes vivants, ce qui inclut les oiseaux, les insectes, les amphibiens de même que les chauves-souris (Laporte, 2005). L'intervalle de fréquences occupé par la biophonie est de 2,5 à 11,05 kHz. Pour sa part l'anthropophonie correspond à tous les sons introduits dans l'environnement par les activités humaines. Son intervalle dans le spectre des fréquences de l'audible se situe entre 0,4 et 2 kHz. Finalement, la géophonie comprend les sons produits par les phénomènes géophysiques, dont la pluie et le vent. Ces sons sont diffusés dans tout le spectre des fréquences de l'audible, soit de 0,08 à 11,50 kHz (Laporte, 2005).

Dans l'environnement sonore, les bruits ambiants peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et provenir de sources utilisant une multitude d'intervalles de fréquences. Nous dirons des bruits naturels qu'ils peuvent être abiotiques (bruit du vent dans les feuilles, ruissellement, pluie, etc.) ou biotiques, et donc émis par une communauté animale (Klump, 1996). Ainsi, les chants ou cris de certaines espèces peuvent être une nuisance pour les autres animaux partageant le même écosystème car ils peuvent créer des interférences entre eux (Brumm, 2004). Quant à eux, les bruits d'origine anthropique peuvent prendre origine dans une multitude de sources (trafic automobile, avion, travaux de construction, ou encore par les moteurs des bateaux en milieu aquatique) (Truax, 1999).



**Figure 1.8.** Le paysage sonore (Gage, 2005).

### 1.3.3. Adaptation du signal sonore chez les animaux

Une étude faite par Katti (Katti *et al.*, 2004), démontre que les individus peuvent aller jusqu'à modifier les caractéristiques de leur signal face à des perturbations sonores d'origines naturelles ou anthropiques et que ces modifications peuvent survenir à court ou à long terme. Un exemple d'une modification à court terme est observable, en outre, chez le rossignol philomèle (*Luscinia megarhynchos*) (Katti, 2004). Ce dernier ajuste l'amplitude de son signal face aux variations du bruit ambiant et ce phénomène s'appelle l'effet Lombard (en raison d'Étienne Lombard qui a d'abord identifié ce phénomène de modification de la prononciation humaine pour compenser la présence de bruits environnants) (Brumm 2004). Plusieurs exemples d'adaptation de l'animal émetteur sont mentionnés dans la littérature dont celui de la mésange Charbonnière (*Parus major*) de l'Europe de l'Ouest qui chante avec une tonalité (fréquence) plus élevée dans un milieu urbain bruyant (63 dB) que dans un environnement moins bruyant (42dB) (Kacelnik, 1983).

Aussi, en milieu naturel la propagation sonore tend à diminuer plus rapidement que le rythme prédit par la loi inverse du carré en raison des nombreuses contraintes qui dégradent la structure du signal sonore (Truax, 1999). La nature de ces contraintes peut prendre plusieurs formes telles que la végétation, la pluie, la topographie, la turbulence atmosphérique, ou encore le vent. Ces facteurs tendent alors à interférer les ondes propagées dans le milieu et, dans la majorité des cas, la distance de propagation en est considérablement réduite (Truax, 1999). Généralement, les ondes les plus affectées sont celles ayant une longueur plus petite ou égale à l'obstacle percuté (feuille, roche, tronc d'arbre, etc.) (Parris, 2002). Ainsi, puisque la fréquence est l'inverse de la longueur d'onde, les hautes fréquences seront atténuées plus rapidement. De plus, la surface d'absorption joue un rôle important dans la propagation du son. Plus une surface est poreuse, plus le son est absorbé. D'ailleurs, l'étude de Parris (2002) émet l'hypothèse selon laquelle certains animaux vont utiliser une surface lisse (un plan d'eau) pour augmenter leur champ d'action par réflexion du signal sur la surface (Parris, 2002). Le milieu est donc un élément

important à prendre en compte lorsque l'on fait un suivi acoustique des espèces puisqu'il influence l'animal émetteur (Parris, 2002).

Une étude menée par Henrik Brumm (Brumm, 2004), toujours sur le rossignol philomèle (*Uscinia megarhynchos*), démontre aussi par une analyse acoustique que, dans un environnement plus bruyant, les individus compensent en chantant plus fort pour attirer les femelles. Or, comme le chant est une très grande dépense énergétique (Brumm, 2004, Grafe, 2005) les mâles retrouvés dans les milieux plus bruyants dépensent plus d'énergie et atteignent rarement une taille aussi importante qu'un individu d'une même espèce se retrouvant dans un milieu moins bruyant (Brumm, 2004). Il est également reconnu que les interférences causées par les bruits anthropiques dans un milieu naturel peuvent influencer le chant et donc la reproduction des oiseaux. Plusieurs études (Reijen *et al.*, 1997, Brumm, 2004) démontrent le signe d'une baisse d'individus et d'espèces dans un milieu affecté par les bruits anthropiques.

De plus, Klump (Klump, 1996) affirme qu'une augmentation du bruit généré par les activités humaines en milieu urbain limite la diversification des espèces, car seules les espèces ayant les capacités d'adaptation à un bruit anthropique vont être en mesure de survivre dans un milieu fortement anthropisé (Klump, 1996). Ainsi, les espèces n'ayant pas les capacités d'adaptation requises vont périr ou tout simplement changer de milieu. Les espèces favorisées en milieu urbain sont celles dont le chant repose au-dessus des fréquences dominées par le trafic et les activités humaines (Slabbekoorn, 2004). Le masquage du signal par des bruits anthropiques peut ainsi compromettre gravement la communication, ce qui conduit à des difficultés dans la défense du territoire, de même que dans l'attrance des femelles envers les mâles de plus petite taille (Beecher, 1988).

Tout comme chez les oiseaux, le chant est la dépense énergétique la plus importante retrouvée chez les anoues (Grafe, 2005). Or, ces derniers sont ectothermes, c'est-à-dire des organismes dont la chaleur qu'ils produisent provient du milieu ambiant dans lequel ils se trouvent. Ils sont donc beaucoup plus sensibles aux conditions météorologiques, ce qui a une influence sur leur période de chant (Bailey, 1991). En effet, la température extérieure influence grandement les attributs des signaux acoustiques qui sont contrôlés par le système

neuromusculaire des organismes (Grafe, 2005). Comme leur pouls est directement relié à la température, ils en sont dépendants et grandement influencés. Une étude effectuée par Grafe et Meuche, 2005 démontre également que le chant est directement relié à la température extérieure. Selon l'étude, la durée d'impulsion tend à décroître lorsque la température décroît, ce qui fait qu'ils ont moins d'énergie à consacrer au chant à basse température (Grafe, 2005).

L'étude effectuée par Grafe (2005) sert également à démontrer l'importance des variables environnementales lors du suivi des espèces. Par ses résultats, ils tentent de démontrer que les populations d'individus peuvent être largement sous-estimées si les inventaires acoustiques des espèces sont effectués à basse température ou dans des conditions non propices au chant; ce qui peut avoir un impact écologique important lors d'une étude d'impacts environnementaux par exemple. Un autre travail de recherche effectué sur une grenouille australienne (*Austrochaperina robusta*) dénote également l'importance des facteurs environnementaux dans le chant et la transmission des signaux acoustiques (Hauselberger & Alford, 2005). Les résultats démontrent une importante influence de la température, la pluie, la luminosité, la pression barométrique de même que la vitesse du vent et des phases de la lune dans les activités de chants des amphibiens (Hauselberger & Alford, 2005).

Dans un souci de suivi des espèces en vue de leur conservation, le relevé des échantillons sonores d'animaux doit donc être effectué durant certaines périodes dites favorables (Parris, 2002, Wong et al., 2004, Kroodsma, 1982). En plus des conditions microclimatiques propices aux individus ectothermes, certaines périodes de la journée sont favorables aux chants. Il s'agit du crépuscule «*Lueur atmosphérique diffuse qui suit le coucher du soleil, ou qui précède son lever*» et de l'aube «*Première lueur du soleil levant, clarté diffuse qui commence à blanchir l'horizon*» (Antidote, 2007).

Le phénomène de chœur (*down et night chorus*) est largement répandu et correspond à ces périodes privilégiées pour entendre le monde animal (Gage et al 2005, Kroodsma et al. 1996, Brown et al. 2003). Cette intense période de vocalises survient

habituellement de trente à soixante minutes avant le lever et après le coucher du soleil (Kroodsma *et al.* 1996) et en général, l'aube est réputée pour entendre les oiseaux (Brown *et al.* 2003) alors que le crépuscule est favorisé pour les batraciens (Fahrig *et al.* 1995, Sun *et al.* 2005) et pour certains insectes nocturnes (Gerhardt *et al.* 2002).

Plusieurs hypothèses tentent d'expliquer ce phénomène acoustique mais la plus répandue est celle de la maximisation de la transmission des signaux acoustiques en fonction des conditions microclimatiques qui règnent à ces heures de la journée (Kroodsma *et al.* 1996, Brown *et al.* 2003).

Une autre hypothèse soulevée pour expliquer le phénomène de chœur est celle de la prédation. Kacelnik (1983) avance que l'aube est une période inefficace pour repérer les proies en raison de la faible luminosité et que les oiseaux allouent leur temps à des activités différentes à des moments opportuns, car ils ne peuvent chanter et se nourrir à la fois. Malgré les nombreuses hypothèses soulevées pour expliquer le phénomène de chœur, l'essentiel est de prélever les échantillons sonores au moment où la biophonie est à son pic journalier afin de ne pas sous-estimer les populations étudiées, c'est-à-dire de 30 à 60 minutes avant le lever et après le coucher du soleil ou avant la tombée de la nuit dans le cas des insectes.

Bref, l'idée d'utiliser le son, la biophonie, afin d'identifier les espèces animales est déjà commune au sein des ornithologues professionnels et amateurs mais peu utilisée dans le domaine du suivi environnemental. Cette perspective, qui a vu le jour à l'aube de l'Année Internationale de la Biodiversité en milieu boréal, est donc très prometteuse si elle s'applique également en milieu tropical.

## Chapitre 2. Objectifs et méthodologie

### 2.1. Objectifs

Afin d'accélérer la poursuite du suivi à l'échelle détaillée de la biodiversité et de prioriser les zones à conserver dans la *Mata Atlântica*, ce projet de recherche a comme objectif général de démontrer qu'il est possible d'associer la biophonie, soit des événements sonores (chants d'oiseaux), à des événements biologiques (la richesse spécifique animale) en quantifiant les espèces enregistrées d'un milieu tropical, à l'aide des chants produits par les oiseaux, les insectes chanteurs de même que par les anoures.

En plus de répondre à cet objectif général, trois objectifs spécifiques ont été définis.

1) Le premier est de comparer la biophonie et l'anthropophonie des milieux soumis à différents niveaux d'anthropisation afin d'évaluer l'impact des bruits anthropiques sur le milieu. En séparant les intervalles de fréquences utilisées par l'anthropophonie et en leur attribuant une valeur mathématique à l'aide de l'application *Biophonie*©, nous serons en mesure de décrire le niveau d'anthropophonie concomitant à la biophonie prélevée durant le même intervalle de temps. Ainsi, en relevant les indices de biodiversité de chacun des types d'aire de conservation (parc écologique, réserve de patrimoine naturel, aire non protégée), il sera possible d'établir un gradient de l'impact causé par l'Homme (bruits) sur le milieu.

Ensuite, une comparaison de la phénologie de ces mêmes milieux, de même qu'un suivi de différents habitats (milieu humide, milieu ouvert, sommet, écotone, milieu forestier) permettront de répondre aux deuxième et troisième objectifs spécifiques qui sont respectivement 2) d'évaluer la variabilité spatiale et 3) temporelle de la biodiversité. Ce projet de recherche a donc comme objectif ultime de valider un indicateur capable de faire le suivi de la biodiversité en milieu tropical. Advenant le cas que cette méthode soit validée en milieu tropical, elle pourra ainsi être utilisée à des fins de conservation, comme outil de suivi dans les parcs nationaux, ou encore elle pourrait servir dans le cadre d'études d'impacts sur l'environnement.

## 2.2. Méthodologie

### 2.2.1. Sites d'étude

Le terrain à l'étude est localisé dans l'État de Santa Catarina, Brésil, dans le biome de la Mata Atlântica. Nous avons choisi trois sites d'échantillonnage exposés à différents niveaux d'anthropisation. Le premier site est le parc écologique de *Spitzkopf* (27° 01' S, 49° 07' W), localisé dans la municipalité de Blumenau à l'intérieur des limites du parc national de la *Serra do Itajaí*. Le parc de *Spitzkopf* est localisé à 15 km de la ville de Blumenau.

Ensuite, des échantillons sont également prélevés dans un milieu fortement anthropisé localisé à 5 km de l'entrée du parc d'Itajaí dans le secteur *Nova Russia* de la municipalité de Blumenau. Il s'agit de la *Pousada Rio da Prata* (27° 01' S, 49° 05' W). Puis, le dernier site est une réserve du patrimoine naturel en devenir localisée dans la municipalité de Gaspar (26° 55' S, 48° 57' W). Pour chacun de ces trois sites, différents habitats ont été sélectionnés afin de tenir compte de la variabilité spatiale de la biodiversité. Des cartes et photos sont disponibles pour chacun des sites à l'étude, ainsi qu'une description plus exhaustive des caractéristiques propres à chacun d'entre eux.



**Figure 2.1.** Les trois sites à l'étude localisés dans la ville de Blumenau, État de Santa Catarina, Brésil (Wikipédia, 2010).

## 2.2.2. Stratégie d'acquisition des données

### Choix des sites à l'étude

Pour atteindre les objectifs de la recherche, les trois sites sont soigneusement présélectionnés selon différents critères qui varient en raison de la méthode de prélèvement utilisée (accessibilité très tôt le matin et en soirée). Les lieux d'étude ont donc été sélectionnés en fonction de la facilité d'accès et des différents milieux que l'on retrouve sur le territoire.

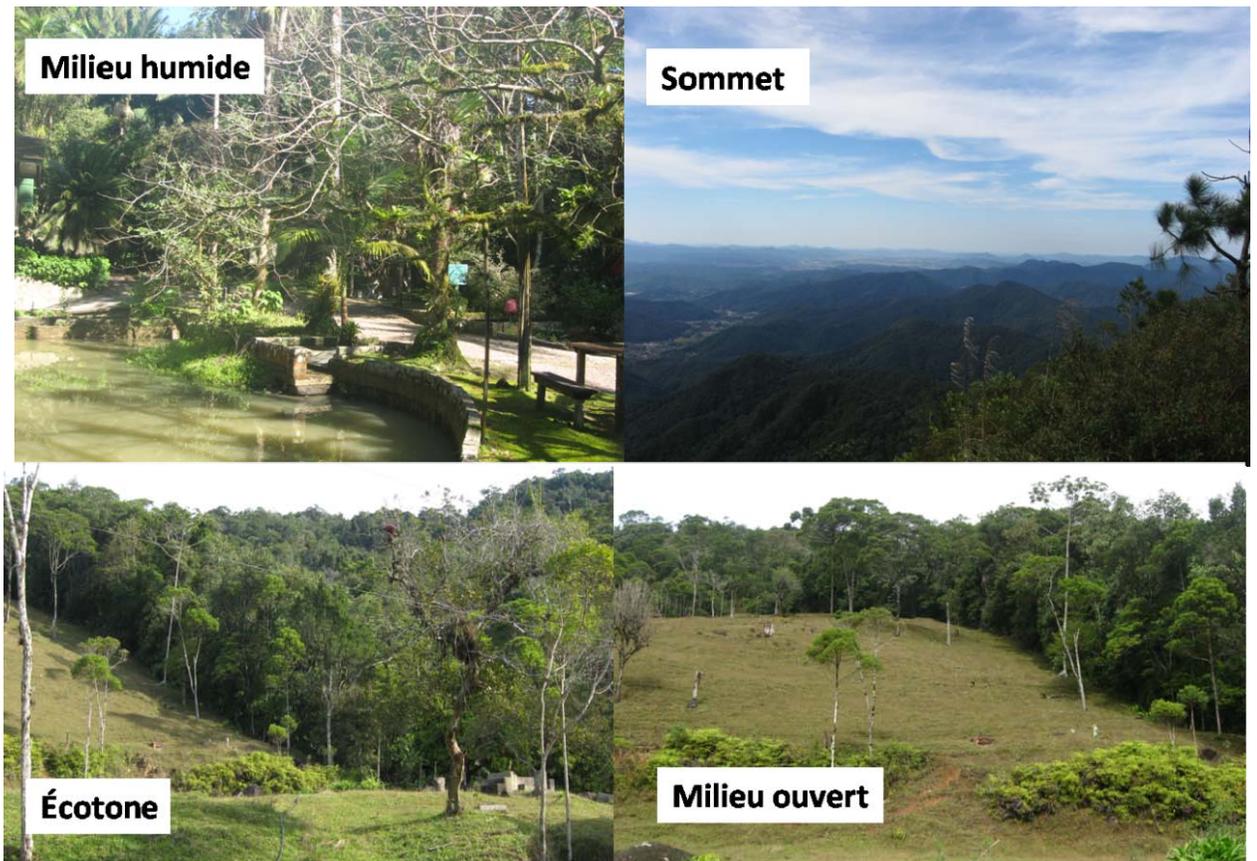
### **Parc écologique de *Spitzkopf***

À l'intérieur du parc écologique de *Spitzkopf*, quatre différents habitats ont été sélectionnés. Il s'agit d'un milieu humide (appareil localisé près d'un étang), d'un milieu ouvert, d'un sommet ainsi que d'un milieu d'écotone.

Le milieu humide est localisé à la base du mont *Spitzkopf*, à une altitude de 273 m et est fortement anthropisé car on y retrouve plusieurs infrastructures destinées à l'hébergement des touristes ainsi qu'un élevage de chiens sur le site. À proximité de l'aire de prélèvement, on retrouve plusieurs arbres fruitiers (caramboles, oranges, limes), de même qu'une résidence permanente appartenant à la propriétaire du site. Le milieu humide en question correspond à un lac artificiel ornemental et est érigé au milieu de plantations anthropiques. On y retrouve également des poules d'élevage et on y entend le chant de coqs assez fréquemment au cours de la journée. Les voitures ont accès au site, bien que la route principale passe à quelques dizaines de mètres du site de prélèvement.

Le milieu ouvert est quant à lui localisé à mi-chemin sur le sentier menant au sommet *Spitzkopf* à une altitude de 563 m. Son envergure correspond à une centaine d'hectares et on y retrouve encore du bétail bien qu'en petite quantité. Il s'agit d'un ancien pâturage en régénération entouré de forêt secondaire en stade de régénération avancé bien conservé. L'achalandage est déjà beaucoup moins important à cet endroit et on n'entend plus les aboiements des chiens. Le sommet du mont *Spitzkopf* est localisé à une altitude de 983 m et composé de végétation de sommet. On y retrouve une aire de camping également accessible en voiture. Lors de la prise d'échantillons, personne d'autre n'était présent sur le site.

Pour sa part, le milieu d'écotone, qui délimite un milieu ouvert d'un milieu forestier, est situé à 575 m dans une forêt secondaire en stade de régénération avancé. Ce milieu est très bien conservé et il n'a connu aucune dégradation depuis près de 70 ans. Il s'agit d'une aire de préservation permanente totalisant environ 500 hectares.



**Figure 2.2.** Photographies des différents milieux prises entre le 3 et le 11 juillet 2009 dans le parc écologique de Spitzkopf, Blumenau (Marie-Claude Provost, 2009).

***Pousada Rio da Prata, Nova Russia***

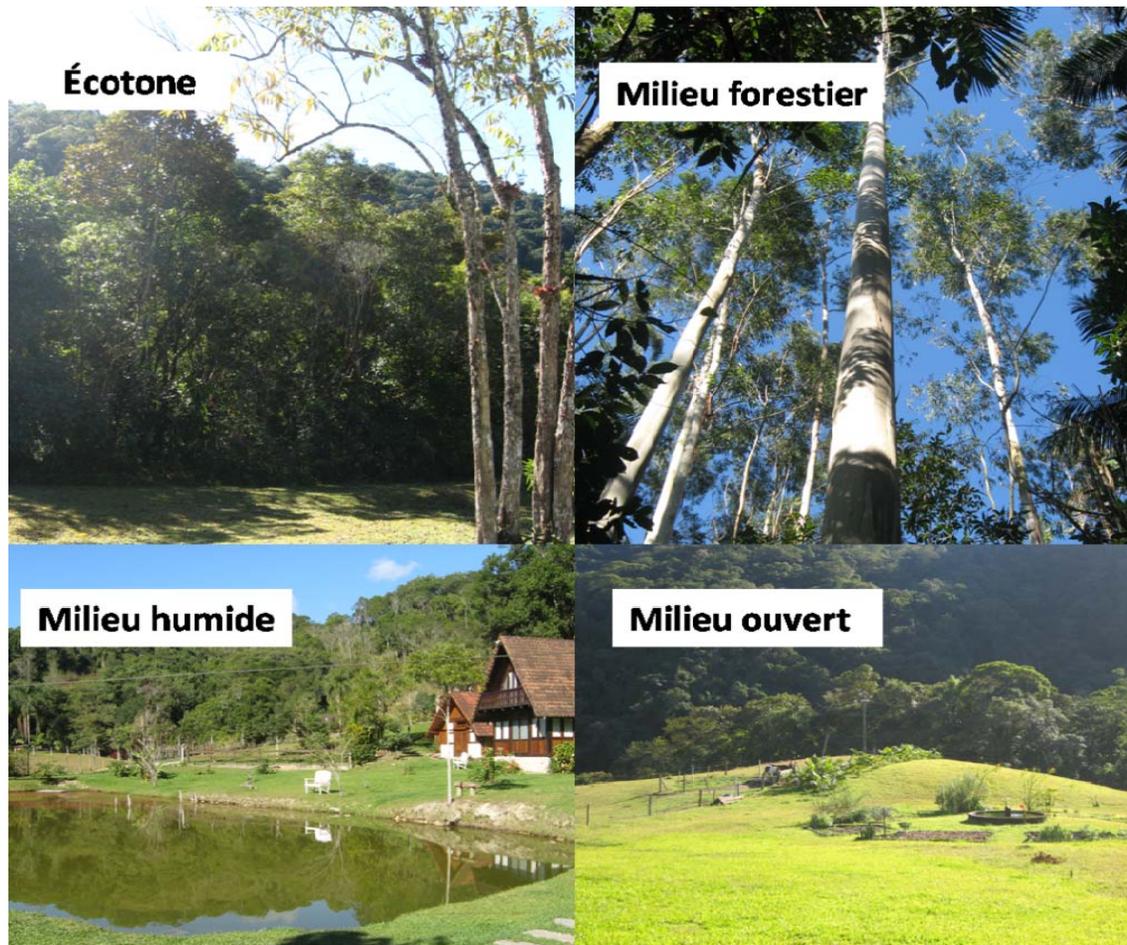
Quatre principaux habitats ont été sélectionnés sur le territoire de la *Pousada Rio da Prata*. Le premier site correspond à un milieu humide anthropisé, c'est-à-dire que l'échantillon sonore est prélevé à proximité d'un étang artificiel en face d'une infrastructure à partir de laquelle se font entendre aboiements et bruits anthropiques divers (routes, voiture, cris d'enfants, musique d'église). Le lac artificiel a une envergure d'environ 50 m<sup>2</sup> et sa fonction est principalement ornementale. On y retrouve des poissons natifs et exotiques et les clients de la *Pousada* peuvent y pratiquer la pêche s'ils le désirent, bien que les poissons ne soient pas comestibles. Selon les propriétaires, près de 1000 personnes séjournent à la *Pousada* chaque année, alors que plus de 10 000 visiteurs/an fréquentent les alentours. Le lac est localisé dans un milieu ouvert à proximité d'un écotone forestier. L'entretien du

gazon est fréquent (ce qui engendre également une pollution sonore importante vue la techniques utilisée). On y retrouve mammifères, insectes, amphibiens et plusieurs oiseaux fréquentant les milieux ouverts. (Quero-quero (*Vanellus chilensis*), Bem-te-vi (*Pitangus sulphuratus*)).

Le second habitat est un milieu ouvert localisé à proximité d'une bande riveraine et d'une forêt secondaire en stade de régénération moyen. Il correspond à un ancien pâturage anthropique et quelques chevaux fréquentent ce site. À cet endroit, le bruit des voitures se fait moins entendre, de même que les aboiements.

Le troisième site est un habitat forestier en stade avancé de régénération. Ce site appartient à la région phytoécologique de la forêt ombrophile dense secondaire de submontagne avancée. La forêt n'a pas été altérée depuis au moins 30 ans, bien que l'on fasse l'entretien d'un sentier forestier visant à promouvoir des activités touristiques. On y retrouve donc randonneurs et des bruits tant naturels qu'anthropiques s'y font entendre. L'influence de la rivière y est importante, principalement en période de pluie. C'est une rivière de classe I avec très peu d'affluents.

Des échantillons ont également été prélevés à proximité d'une aire forestière dans laquelle des Eucalyptus ont été planté. Il s'agit d'une forêt secondaire où les espèces natives ont été coupées pour donner place à une plantation d'Eucalyptus. Cette plantation a environ 35 ans mais comme cette espèce est nocive pour les autres plantes, on y retrouve que très peu d'autres espèces à proximité. Cette parcelle est encerclée par une aire de forêt secondaire et se situe à environ 200 m du parc national de la Serra do Itajaí.



**Figure 2.3.** Photographies prises entre le 14 juin et le 24 juin 2009, Pousada Rio da Prata, SC, Brésil (Marie-Claude Provost, 2009).

### **Gaspar, RPPN en devenir**

Les principaux habitats à l'étude sélectionnés dans la municipalité de Gaspar sont, encore une fois, un milieu ouvert, un milieu humide et un milieu plus forestier. Pour sa part, le site sélectionné dans la municipalité de Gaspar est très peu fréquenté par l'Homme car il s'agit d'une portion de territoire privé et la famille qui le possède veut en faire une zone de régénération de la forêt. Les seuls bruits anthropiques que l'on y retrouve sont liés à la présence des quelques infrastructures résidentielles dans le secteur de même que les

voitures qui passent sur la route secondaire située à quelques mètres des sites étudiés. Aucune attraction touristique n'est installée sur le site destiné à devenir une réserve naturelle. La forêt secondaire appartient au stade de régénération avancé et est conservée depuis 50 ans. Le milieu ouvert correspond à un pâturage anthropique. On y retrouve également mammifères, insectes, amphibiens, de même que des oiseaux fréquentant les milieux ouverts ou forestiers.



**Figure 2.4.** Photographies prises entre le 25 juin et le 4 juillet, Gaspar, Brésil (Marie-Claude Provost, 2009).

**Tableau 2.1.** Caractéristiques des trois sites d'étude

<b>Caractéristiques des sites</b>	<b>Spitzkopf</b>	<b>Rio da Prata</b>	<b>Gaspar</b>
<b>Type de préservation du territoire</b>	Parc écologique	Aucune	Réserve particulière de patrimoine naturelle (en devenir)
<b>Distance de la ville de Blumenau (km)</b>	13 (accessible en transport en commun)	16 (accessible en transport en commun)	30 (le site n'est pas accessible en transport en commun, route secondaire pour y accéder)
<b>Nombre de visiteurs/année</b>	+3000 (selon la propriétaire du site en date du 9 juillet 2009)	+10000 (selon les propriétaires du site en date du 20 juin 2009)	Pas de visiteur autre que la famille qui vit à proximité. (composée de 3 enfants et 2 adultes)
<b>Hébergement public</b>	Oui, 6 chalets sur le territoire (capacité d'accueil jusqu'à 30 personnes)	Oui, 3 chalets et un dortoir, (capacité d'accueil jusqu'à 45 personnes).	Non
<b>Zone résidentielle à proximité</b>	Oui	Oui	Oui
<b>Présence de chien</b>	Oui, élevage de chiens sur le site	Oui, plusieurs chiens dans la zone résidentielle	Non
<b>Attrait touristique</b>	Mont Spitzkopf, piscine naturelle	Mines d'argent, équitation, baignade promenades, à 5 km du PNSI	Non
<b>Zone de pâturage exploitée</b>	Oui	Non	Non

### 2.2.3. Plan d'échantillonnage

L'environnement sonore des différents sites à l'étude a été prélevé au cours des mois de juin et juillet 2009 (du 14 juin au 12 juillet 2009, donc durant 30 jours consécutifs), ce qui correspond à la saison hivernale brésilienne. Dans la ville de Blumenau, la saison hivernale correspond à l'époque où l'activité biologique est à son plus bas niveau en raison des conditions climatiques ambiantes (Morellato et *al.*, 2000). Ces dernières se caractérisent par l'arrivée de fronts froids qui vont donner place à des masses d'air froid, faisant ainsi chuter la température moyenne (pour Blumenau, la moyenne hivernale se situe entre 12 et 18 °C). (Comite Itajaí, 2009).

Plusieurs échantillons ont été prélevés durant la même journée afin de tenir compte de la variabilité temporelle de la biodiversité. Il est à noter que comme une seule personne échantillonnait, chaque site a été échantillonné durant 10 jours consécutifs (*Pousada Rio da Prata* du 14 juin au 23 juin 2009, réserve de Gaspar du 24 juin au 3 juillet 2009 et le parc écologique de *Spizkopf* du 4 juillet au 11 juillet 2009, la dernière journée étant trop pluvieuse). Aucun des enregistrements n'a donc été prélevé sur deux sites simultanément.

#### Instruments et techniques

La méthode d'échantillonnage utilisée pour la réalisation de ce projet de recherche est un enregistreur audio de marque *Marantz Professional PMD660* qui enregistre des fichiers numériques audio sur une carte mémoire *Compact Flash*. Les données numériques sont également enregistrées sous la forme *Wave sound (.wav)*. Cet appareil portable fonctionne à pile, ce qui lui confère l'avantage de pouvoir être positionné loin d'une source électrique, en pleine forêt par exemple. Il est composé du capteur sonore qui est relié à un microphone multidirectionnel ayant lui aussi un rayon de capacité d'environ 30 m sous des conditions favorables (la pluie et le vent diminuant le rayon sonore). Le microphone multidirectionnel est essentiel lors de ce type de travaux de terrain car il est moins sensible au vent, de même qu'aux manipulations effectuées lors des enregistrements (Pavan, 2008).



**Figure 2.5.** Enregistreur audio de marque *Marantz Professional PMD660* ([www.sonstudio.com](http://www.sonstudio.com))

Le microphone est alors déposé sur le sol par le chercheur à proximité du site préalablement choisi (selon les différents milieux). Le chercheur enclenche manuellement le bouton *Record* de l'appareil à l'heure désirée pour amorcer la prise de l'échantillon et appuie sur la touche *Stop* lorsque désiré. La durée maximale des enregistrements ponctuels est de 1 heure. Lors de l'enregistrement, le chercheur quitte les lieux pour ne pas nuire à la qualité de l'échantillon ou ne pas perturber la faune aviaire qui pourrait s'enfuir ou changer ses habitudes de chants.

Comme le chercheur enclenche manuellement l'appareil pour les enregistrements, c'est ce dernier qui choisit le moment de la journée pour effectuer les échantillons. En raison du phénomène de chœur, nous avons choisi de prélever des échantillons à 6 différents moments de la journée afin de déterminer si ce phénomène est perceptible à cette période de l'année. Nous avons donc la **période 1)** aube (*down chorus*) de 6h45 à 7h45, **2)** matin de 9h à 11h, **3)** midi de 11h30 à 13h30, **4)** après-midi de 14h à 15h30, **5)** crépuscule1 de 16h30 à 17h30 et **6)** crépuscule2 après 17h30.

Dans le cadre de ce projet, nous avons choisi de comparer la biophonie à différents moments de la journée car l'un des objectifs de la recherche vise à étudier la variabilité temporelle de la biodiversité. Ainsi, plusieurs échantillons sont récoltés sur le même site à différentes heures de la journée afin de valider le phénomène acoustique du chœur qui a lieu principalement à l'aube et au crépuscule (*down et night chorus*). Il est important de mentionner que les comparaisons de biophonie seront effectuées avec des échantillons ayant été prélevés sensiblement aux mêmes heures sur les différents sites à l'étude et dans différents **milieux** que sont : **1)** milieu forestier, **2)** écotone, **3)** milieu humide, **4)** sommet, **5)** milieu ouvert. Dans un souci de comparaison de différentes variables, l'appareil Kestrel 4000 est utilisé pour mesurer la température, la vitesse du vent, l'humidité relative, la pression ainsi que l'altitude.



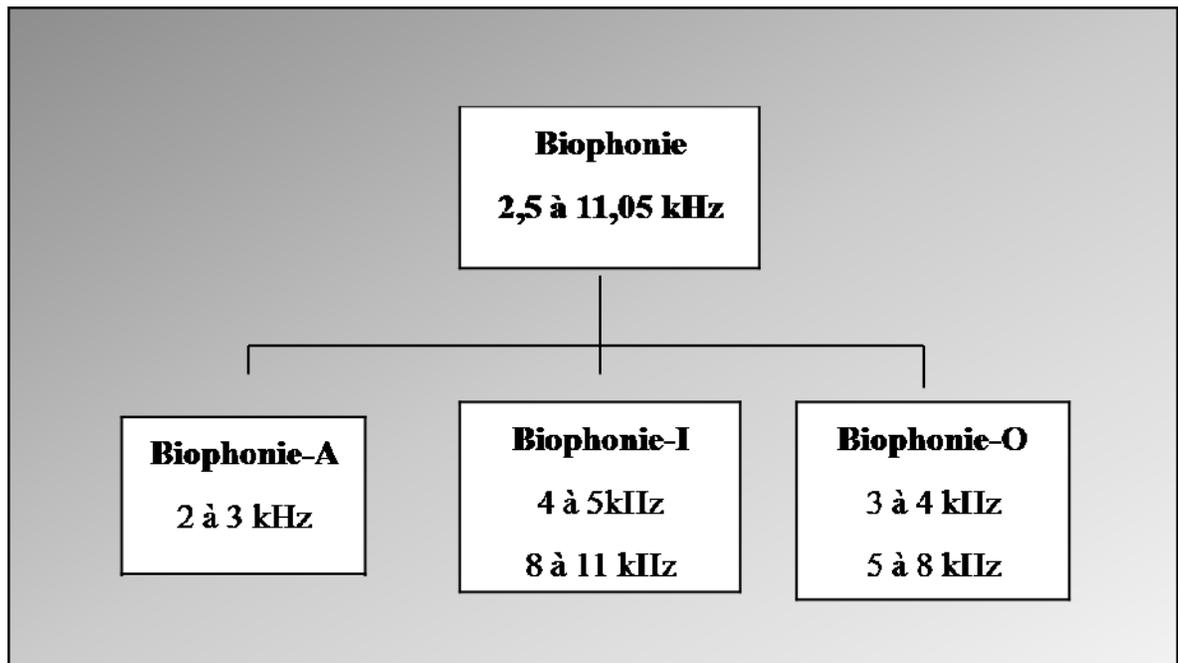
**Figure 2.6.** Appareil *Kestrel* 4000, Kestrel 2010.

Lors de la prise de données, chaque échantillon est identifié par la date à laquelle il est prélevé, de même que par l'heure de la journée. Le nom donné à chaque échantillon est composé de l'année, du jour, de l'heure. Pour chaque échantillon, le chercheur note le numéro de piste correspondant, la date, l'heure, la température, la vitesse du vent, le point de rosée, la pression barométrique, l'altitude, de même que la météo.

Dans tous les cas, les données météorologiques sont recueillies pour chaque échantillon, comprenant la température ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) de même que l'humidité relative ( $\pm 0,5\%$ ). Dans le cas du **couvert nuageux**, les données ont été inscrites comme suit : 1) ciel dégagé, 2) partiellement dégagé, 3) nuageux et 4) pluie. (Il est important de mentionner que les échantillons pris lors de journées pluvieuses doivent être retirés, car le son de la pluie modifie les données acoustiques). Pour ce qui est du **vent**, les données ont été notées comme suit : 1) 0 m/s 2) 0-0,5 m/s 3) 0,5-2 m/s et 4) 2 m/s et plus (Sueur, 2008). Ainsi, suite à leur enregistrement, les échantillons sont gravés et archivés sur le disque dur de l'ordinateur de même que sur CD.

#### **2.2.4. Catégorisation de la biophonie**

Suite à la réalisation des travaux de Gage *et al.* (Gage *et al.* 2005), la biophonie correspondant aux chants des insectes, des oiseaux et des anoues a été divisée en trois sous-ensembles, en fonction des intervalles de fréquences propres à chacun de ces groupes. Cette catégorisation permettra ainsi de comparer les différents écosystèmes en obtenant l'indice de biodiversité pour chacun des groupes, car chaque espèce possède sa propre fréquence de chant. Ainsi, la biophonie occupe des fréquences allant de 2,5 à 11,05 kHz. De ce fait, le groupe des Insectes utilise des fréquences allant de 4 à 5 kHz et de 8 à 11 kHz, les Oiseaux de 3 à 4 kHz et de 5 à 8 kHz alors que les anoues utilisent des fréquences allant de 2 à 3 kHz. De plus, comme les intervalles ne se chevauchent pas, chaque fréquence est exclusive à une seule des trois catégories de biophonie (Gage *et al.* 2005).

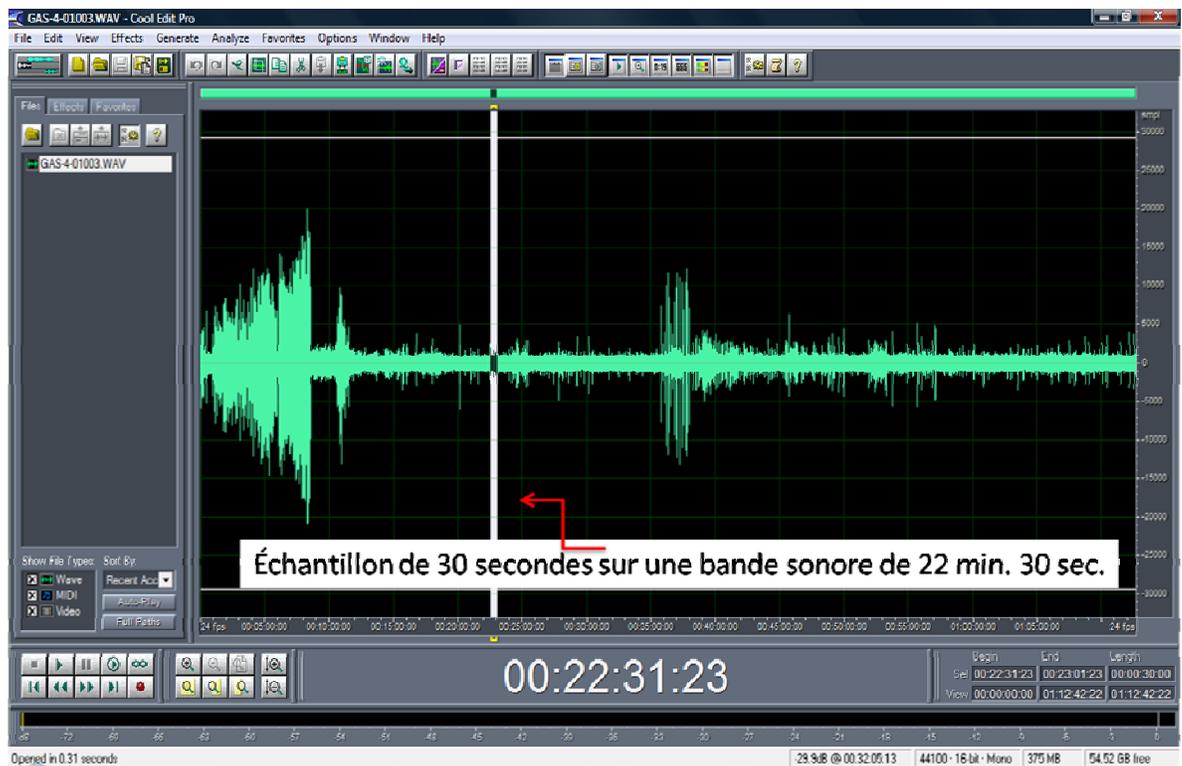


**Figure 2.7.** Caractérisation de la biophonie. Biophonie-A correspond aux intervalles de fréquences engendrés par les chants des anoures, Biophonie-I des insectes et Biophonie-O des oiseaux (Gage *et al.*, 2005).

### 2.2.5. Traitement des données

Comme les échantillons sont prélevés dans un environnement sonore naturel, il est normal que plusieurs bruits provenant de sources distinctes (géophonie, anthropophonie) se retrouvent sur les fichiers enregistrés. C'est pourquoi un traitement des échantillons devient essentiel avant de procéder à l'analyse des données. L'étape du traitement consiste à écouter chaque échantillon récolté par l'appareil afin d'en retirer ceux enregistrés lors de jour de pluie car les fréquences utilisées par la biophonie sont rapidement saturées par l'intensité sonore émise par cette dernière. Une fois ces échantillons retirés, il faut procéder à la «coupure» des échantillons en plus petits formats. Comme nous l'avons mentionné, nous prenons des échantillons d'une durée variant de 30 à 60 minutes, selon les conditions rencontrées (en cas de pluie nous devons arrêter l'échantillonnage). Or, le programme *Biophonie*© créé dans MATLAB ne peut traiter des fichiers aussi volumineux. Il faut donc extraire plusieurs échantillons (format *wav.*) d'une durée de 30 secondes. Afin de ne pas influencer le choix des séquences sélectionnées, nous avons établi de prélever 30 secondes

de son toutes les 5 minutes de chaque échantillon. Ainsi, un échantillon d'une durée d'une heure donne 13 sous-échantillons sonores. Ce procédé se fait à l'aide du logiciel *Cool Edit Pro version 2.1*. Après que l'échantillon sonore soit importé dans le logiciel, il suffit de sélectionner des parcelles de 30 secondes toutes les 5 minutes et d'enregistrer les nouveaux fichiers. Une fois dans la base de données, les 13 échantillons pris à chaque heure ont été agrégés par leur moyenne afin de réduire les effets de dépendance des répliques entre eux. Ainsi, chaque échantillon présent dans la banque de données finales correspond à la moyenne des répliques pris au cours de la même heure.

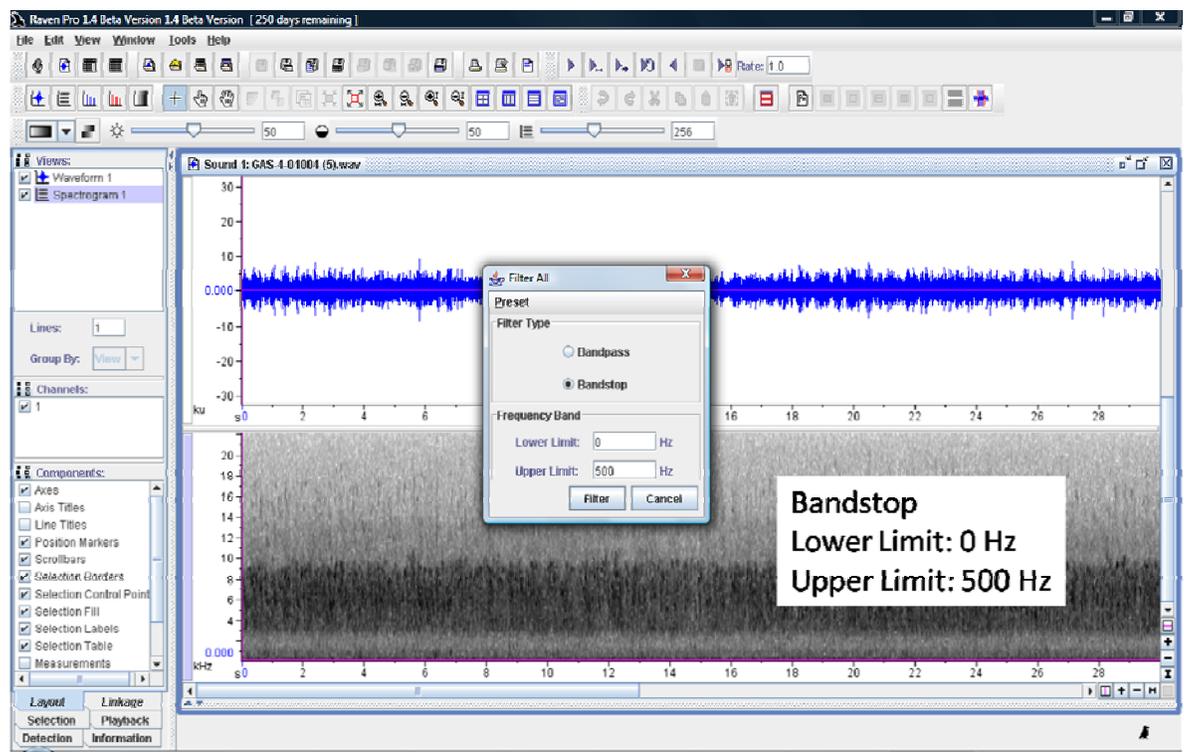


**Figure 2.8.** Oscillogramme (logiciel *CoolEdit Pro version 2.1*) d'une durée de 22 min. 30 sec. et coupé en sous-échantillon de 30 secondes en vue de l'analyse.

### Le filtrage

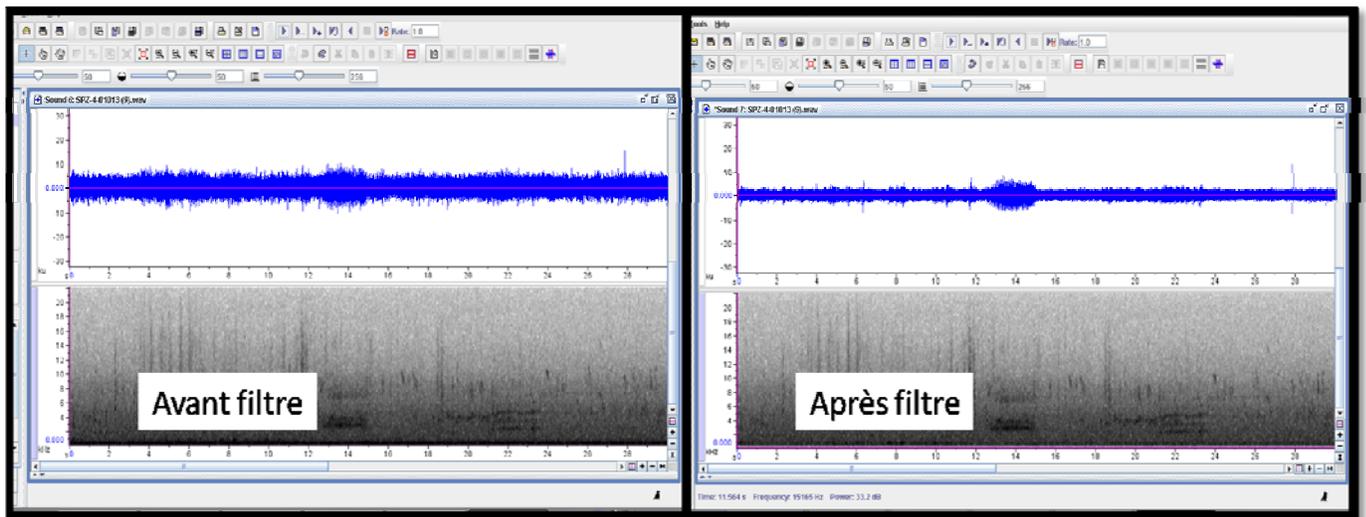
Avant d'analyser les fréquences émises par la biophonie présente sur les sites d'étude, il faut d'abord procéder à un filtrage. Lors de cette première étape, l'échantillon sonore est passé à travers un filtre *passé-haut* (filtre qui laisse passer les hautes fréquences et qui atténue les basses fréquences) permettant ainsi de réduire, voire même d'éliminer les

sons d'origine anthropique (généralement occupés par les basses fréquences du spectre sonore), de même que les bruits engendrés par le chercheur émis lors de l'enregistrement (buzz, tic, etc.). Il est à noter qu'une copie de l'ensemble des échantillons non filtrés a également été traitée dans le logiciel MATLAB v.7.9. afin de comparer les échantillons filtrés à ceux non filtrés, ce qui nous donnera au final l'énergie spectrale occupée par l'anthropophonie (on calcule d'abord à l'aide du logiciel l'énergie totale émise par les échantillons non filtrés puis l'énergie émise par les échantillons filtrés. En soustrayant le second du premier, on obtient une valeur correspondant à l'anthropophonie). Pour procéder au filtrage, il suffit de prendre les échantillons de 30 secondes et de les importer dans le logiciel *Raven Pro version 1.4*. (créé par le *Cornell Lab of Ornithology*). Une fois importé, on applique la fonction *Band Filter* et on sélectionne la fonction *Bandstop* avec une limite inférieure de 0 Hz et une limite supérieure de 500 Hz. Ainsi, les sons en-deçà de 500 Hz seront automatiquement éliminés par ce filtre.



**Figure 2.9.** Fonction *Band Filter* du logiciel *Raven Pro version 1.4*. Une fois la commande *BandStop* sélectionnée, il faut ajuster les paramètres de *Lower limit* à 0 Hz et de *Upper Limit* à 500 Hz.

La figure 2.10. représente un échantillon de 30 secondes (GAS-4-01004 (5) wav.) avant d'être filtré et après le filtrage. Nous remarquons que la largeur de la bande bleue de l'oscillogramme qui correspond aux fréquences enregistrées est plus mince une fois le filtre appliqué. L'étape suivante consiste à analyser le signal sonore.



**Figure 2.10.** Échantillon de 30 secondes (GAS-4-01004 (5) wav.) avant et après le filtrage. L'oscillogramme de gauche indique une plus grande étendue des fréquences alors qu'une fois filtré, cette étendue se voit diminuée.

### 2.2.6. Analyse du signal sonore

Après avoir filtré chaque échantillon, l'étape suivante consiste en l'extraction d'une valeur numérique du signal sonore correspondant à l'intensité de la biophonie de chacun des groupes mentionnés (oiseaux, insectes et anoues), de même qu'à l'énergie totale émise au cours de l'enregistrement. Pour ce faire, nous avons recours à la méthode du signal direct qui vise à une analyse directe du signal sonore. Cette méthode, qui est à l'origine une analyse basée sur les statistiques (Hopp *et al.* 1998), s'effectue à l'aide d'une application,

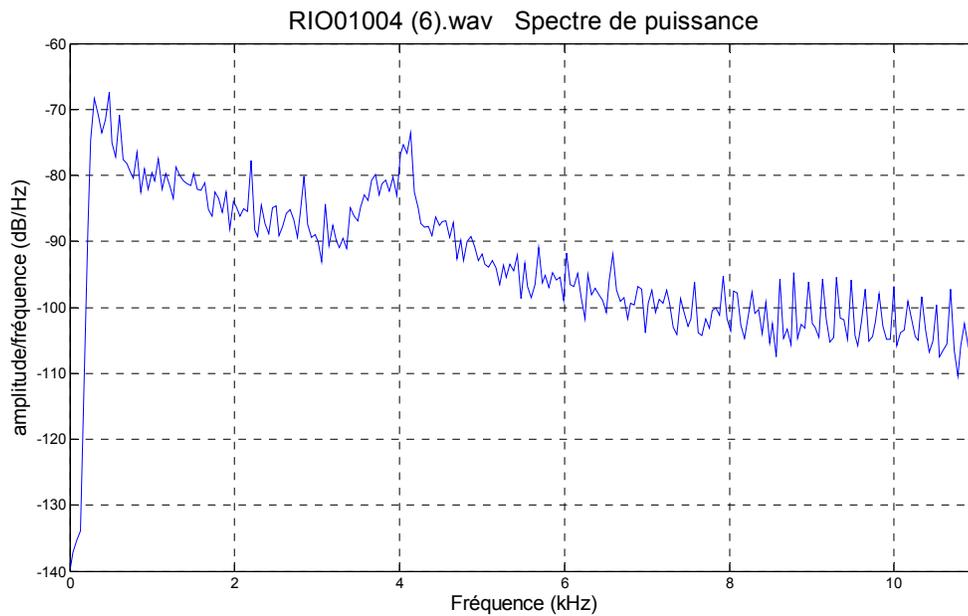
baptisée *Biophonie*©, qui a été développé dans le logiciel MATLAB v.7.9 par Isabelle Laporte en collaboration avec le *Computational Ecology and Visualisation Laboratory* (CEVL) et le *Remote Environmental Assessment Laboratory* (REAL) de la *Michigan State University* (Laporte, 2005).

L'analyse du signal direct consiste donc à calculer la distribution de la puissance (dB/Hz) au sein du spectre du signal sonore et à extraire de cette distribution les valeurs de puissance correspondant aux intervalles des fréquences des différentes biophonies (Laporte, 2005). Pour ce faire, la densité spectrale de puissance (DSP) est calculée pour chaque échantillon et elle se calcule à l'aide de la transformée de Fourier d'un signal (Hopp *et al.* 1998; Laporte, 2005). La DSP représente la distribution, en fonction de la fréquence, et donc de la puissance contenue dans un signal et les valeurs qui lui sont attribuées sont toujours réelles et positives. Pour estimer la DSP des échantillons, la méthode *Welch* est employée. Cette méthode consiste à découper le signal en sous-séquences, nommée fenêtres, dans lesquelles la transformée de Fourier est calculée (Laporte, 2005). La particularité de la méthode de *Welch* est le chevauchement des fenêtres d'analyse. Le but de ceci est de permettre une estimation plus juste de la DSP moyenne (MathWorks 2009).

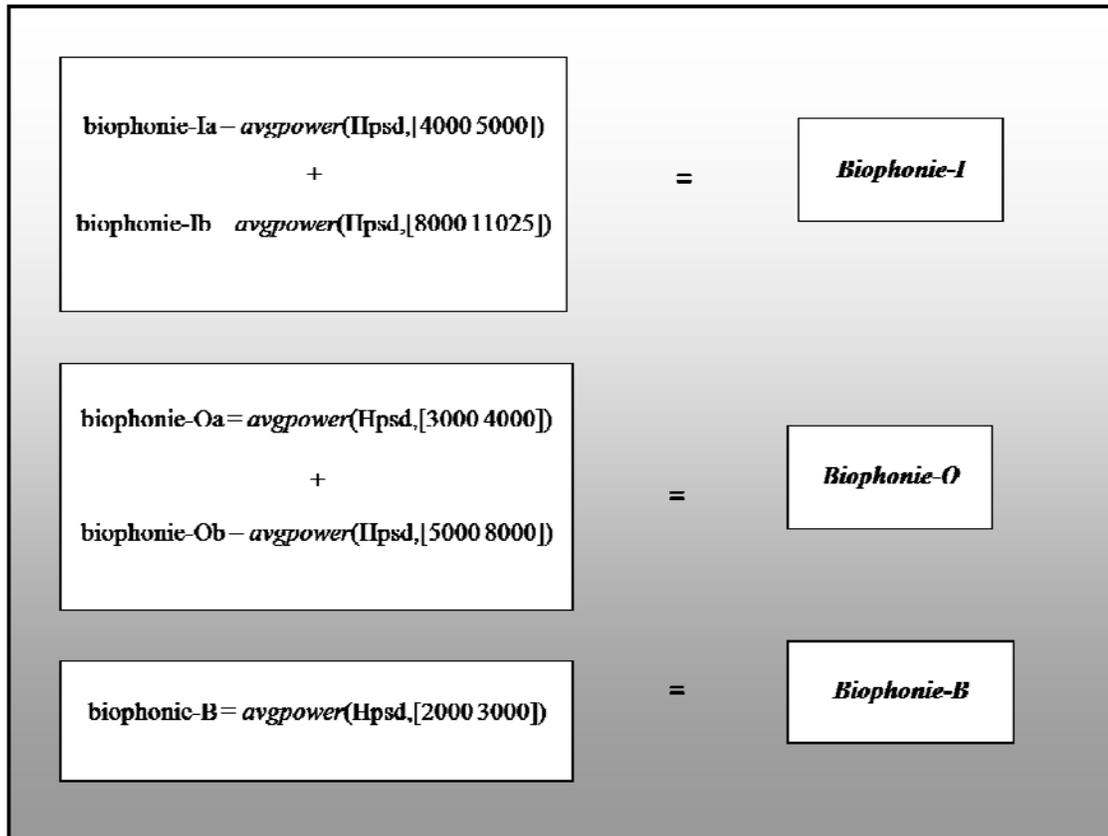
Dans le programme *Biophonie*©, la DSP est calculée selon la méthode *Welch*, c'est-à-dire que le signal sonore d'une durée de 30 secondes est divisé en 8 fenêtres de type *Hamming* de 3,75 secondes avec un chevauchement de 50% entre chacune d'elle. Le nombre de points relatifs à l'algorithme des transformations de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) a été fixé à 512 et la fréquence d'échantillonnage demeure celle des échantillons, soit 22 050Hz. La fonction précisément utilisée pour ce calcul dans *Biophonie*© est la fonction *pwelch* du logiciel MATLAB (MathWorks 2009; Laporte, 2005). La DSP peut être exprimée sous forme d'un graphique comme sur la figure 2.11.

Suite à son calcul, la DSP est transformée en objet, nommé *Hpsd*, à l'aide de la fonction *dspdata.psd*. La transformation en objet est nécessaire, selon les fonctions

prédéfinies dans MATLAB, pour le calcul éventuel de la puissance moyenne. L'étape du calcul de la puissance moyenne est une autre étape importante de l'analyse, car c'est à ce moment que sont calculées les valeurs de puissance (dB/Hz) relatives à chacun des intervalles de fréquences de la biophonie-O-I-B. La fonction *avgpower* permet ce calcul avec des intervalles de fréquence ayant une précision pouvant atteindre, pour l'instant, 50Hz. Le calcul est en fait la moyenne des différentes valeurs de puissance comprises dans l'intervalle demandé. Pour ce projet, les intervalles calculés avec la fonction *avgpower* sont les mêmes que ceux présentés sur la figure 2.12.



**Figure 2.11.** La densité spectrale de puissance de l'échantillon sonore RIO1004 (6) prélevé à la *Pousada Rio da Prata* le 20 juin 2009 à 7h00 généré par MATLAB. La puissance est exprimée en dB/Hz sur une échelle négative en fonction des fréquences (Hz). Ce graphique représente la distribution de la puissance au sein du spectre sonore.



**Figure 2.12.** Le calcul de la biophonie dans MATLAB Exemple de code de *Biophonie*© (à gauche) et les formules du calcul final des trois biophonies.

InsecteA	InsecteB	OiseauA	OiseauB	Bactraciens	Total
2.0048	2.8994	2.5395	3.5477	1.1661	854.04
1.9852	2.5764	2.0732	3.3883	1.2145	304.54
1.8868	2.6407	2.1315	3.1357	1.3167	692.15
1.8474	4.3893	1.8158	2.9816	1.0511	123.86
1.8665	71.98	2.0558	3.3664	0.95592	272.12
2.0297	2.4578	2.0696	3.3342	1.0288	137.11
1.6124	36.439	2.2149	3.1491	1.2984	262.75
8.6347	2.5622	5.4906	3.6144	3.0789	85.555
7.8766	2.7236	6.9584	3.9663	4.5742	110.21
1.8107	2.8115	2.1439	3.5246	3.356	153.43
2.1227	2.7164	2.7475	2.9488	3.2214	247.36
1.9795	2.7739	2.3142	2.9844	1.9636	256.24
14.115	2.7642	18.601	4.0033	12.959	307.21
3.8099	2.6349	16.039	3.2655	5.6105	183.77

**Figure 2.13.** Résultat (14 premières lignes du tableau généré) de l'analyse à l'aide du programme *Biophonie*© affiché sous forme d'un tableau ( $\times 10^6$ ) La valeur encadrée équivaut donc à l'énergie spectrale de l'échantillon. (Image partielle du tableau généré).

Ainsi, pour 802 échantillons sonores, 802 DSP moyennes sont calculées et de chaque DSP, 3 valeurs de biophonie (Insecte, Oiseau et Batracien) sont extraites en plus de l'énergie spectrale totale émis. Le résultat de l'analyse à l'aide du programme *Biophonie*© est affiché sous forme d'un tableau dans le chiffrier Excel (Figure 2.13).

## 2.2.7. Analyses statistiques

### 2.2.7.1 Statistiques descriptives

La normalité des distributions, l'homogénéité des distributions et les mesures de tendance centrale n'ont pu être effectuées sur l'ensemble des statistiques descriptives en raison de la variance très importante de la variable *biophonie*. Les statistiques descriptives ont été obtenues à l'aide du logiciel *SPSS* version 17.0.

### 2.2.7.2 Biodiversité et biophonie

Une comparaison entre la biophonie de différents milieux a été effectuée. Dans ce contexte, les échantillons proviennent de travaux de recherche antérieurs puisqu'il s'agit de comparer la biophonie d'un milieu boréal avec la biophonie d'un milieu tropical. En ayant des échantillons de biophonie pour trois milieux (un milieu boréal, un mixte et un tropical), de même que des relevés de biodiversité prélevés dans les mêmes milieux, il est possible de faire une association des variables entre elles. Ainsi, une régression linéaire simple a été effectuée pour voir le lien statistique entre la biophonie et la biodiversité. Les conditions d'applications sont toutes respectées, bien que l'échantillon ( $n=3$ ) soit très faible. Nous sommes conscients du fait que l'échantillon soit très petit mais la différence entre les milieux est significative. Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel *SPSS version 17.0*, ainsi que dans le logiciel *Excel*.

### 2.2.7.3. Anthropophonie et biophonie

Afin d'analyser les variables d'anthropophonie et de biophonie, les échantillons ont été agrégés par leur moyenne pour réduire les risques de dépendance des échantillons entre

eux. Les corrélations effectuées sont des corrélations de Spearman afin de réduire l'impact des valeurs extrêmes sur les résultats finaux (Scherrer, 2007). Les résultats pour les corrélations de Spearman et les régressions linéaires simples ont été obtenus à l'aide des logiciels *SPSS version 17.0* et *Excel*.

#### **2.2.7.4 Variabilité spatiale et temporelle**

Afin de vérifier la variabilité spatiale et temporelle de la biodiversité par la biophonie, les tests statistiques employés sont des tests non-paramétriques, car les données obtenues suite à l'analyse n'affichent pas une distribution normale. Tous les tests ont été effectués dans le logiciel SPSS version 17.0. Dans un objectif de comparaison entre les différentes périodes au sein d'un même site, un test d'analyse de variance multiple a été appliqué. Ce test, de Kruskal-Wallis, est calculé unilatéralement, pour un niveau d'erreur alpha ( $\alpha$ ) de 0,01. Le test du L.S.D. (*Least Significant Difference*) a été employé ( $\alpha = 0,05$ ) afin de déterminer, suite au test de Kruskal-Wallis, quel échantillon ou quels groupes d'échantillons sont différents au sein d'un même ensemble. Pour mener à terme ce test, un test d'ANOVA a précédé celui du L.S.D. Il est à noter que le test de l'ANOVA a conclu aux mêmes décisions statistiques que celles du Kruskal-Wallis, malgré le fait que le postulat de la normalité ne soit pas conforme. Ce test, ainsi que tous les autres utilisés précédemment, servent principalement à valider la signification des résultats.

Puisque nous ne pouvions pas accéder aux mêmes milieux au cours des mêmes périodes sur l'ensemble de nos trois sites, une bonne partie de l'analyse sera descriptive en raison de la dépendance des facteurs entre eux (Scherrer, 2007). Nous ne pourrions effectuer des tests statistiques sur l'ensemble des variables entre elles comme il aurait été souhaité au départ. Une présentation de la matrice des données permettra de comprendre l'interdépendance des variables entre elles, de même que la non-disponibilité de plusieurs données.

## Chapitre 3. Résultats

Les divers résultats sont présentés par objectifs, dans le même ordre qu'ils ont été annoncés précédemment. Chacune des figures présentées renvoie aux données qui ont été récoltées sur les sites d'étude, à moins que l'on fasse mention d'une référence à des données ayant été récoltées antérieurement dans le cadre de d'autres projets de recherche.

### 3.1 Statistiques descriptives des sites échantillonnés

Le tableau 3.1 illustre les principales variables étudiées dans le présent projet pour chacun des sites. Il s'agit de la biophonie en fonction des milieux, de même que la biophonie moyenne selon les différentes périodes de la journée. Chaque échantillon représente la moyenne des répliques prélevées pour une heure d'échantillonnage. Le site **1** renvoie à la *Pousada Rio da Prata* (milieu sans protection), le site **2** à Gaspar (réserve de protection naturelle) et le site **3** à *Spitzkopf* (parc écologique). Pour ce qui est des périodes, la période 1) est le *down chorus* (une heure avant le lever du soleil), la période 2) est le matin, 3) midi, 4) après-midi 5) crépuscule1 et 6) crépuscule2. Le milieu 1) se réfère au milieu forestier, le milieu 2) écotone, 3) humide, 4) sommet, et 5) ouvert. Les valeurs illustrées au tableau 3.2 démontrent pourquoi les prémisses d'une analyse statistique paramétrique entre les différents sites ne sont pas respectées. Nous remarquons la présence de plusieurs 0 (absence de résultats) dans ce tableau croisé entre les périodes et les milieux des différents sites. Ceci ne permet pas la réalisation d'une ANOVA à plusieurs facteurs entre les sites et nous oblige à analyser chacun des sites séparément pour en tirer des résultats statistiquement acceptables (Sokal et Rohlf, 1995). De plus, les différents milieux sont considérés comme étant des variables dépendantes puisque l'on ne peut prélever deux milieux au cours de la même période (impossibilité d'échantillonner à deux endroits au même moment puisqu'il n'y avait qu'une seule personne pour prélever les sons sur le terrain). En résumé, nous remarquons ici que 41 échantillons ont été prélevés sur le site de *Rio da Prata* (ce qui correspond à environ 50 heures d'enregistrement (considérant que les journées pluvieuses ont été retirées), 44 au site de Gaspar et 32 au site de *Spitzkopf*.

**Tableau 3.1.** Statistiques descriptives des variables « période » et « milieu » de la biophonie de chacun des sites.

						<b>N valide</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>
<b>Site 1</b>	<b>Periode 1</b>	<b>Milieu 2</b>	Biophony	N=1	79.585	.		
			Biophony	N=8	107.837	137.554		
			Biophony	N=3	282.122	78.630		
		<b>Milieu 3</b>	Biophony	N=1	81.937	.		
			Biophony	N=3	73.560	32.758		
			Biophony	N=1	20.863	.		
		<b>Milieu 5</b>	Biophony	N=1	268.322	.		
			Biophony	N=3	5566.902	9540.116		
			Biophony	N=1	38.387	.		
		<b>Periode 2</b>	<b>Milieu 2</b>	Biophony	N=1	17.192	.	
				Biophony	N=2	161.362	142.304	
				Biophony	N=2	80.168	77.934	
	<b>Milieu 5</b>		Biophony	N=1	311.969	.		
			Biophony	N=2	246.118	251.036		
			Biophony	N=3	112.299	80.498		
	<b>Periode 3</b>	<b>Milieu 2</b>	Biophony	N=2	380.396	493.370		
			Biophony	N=4	252.936	248.380		
			Biophony	N=2	40.463	37.551		
		<b>Milieu 5</b>	Biophony	N=2	361.063	228.995		
			Biophony	N=3	334.301	342.686		
			Biophony	N=1	127.750	.		
	<b>Periode 4</b>	<b>Milieu 5</b>	Biophony	N=2	86.240	1.083		
			Biophony	N=5	469.234	517.744		
			Biophony	N=2	257.171	142.418		
<b>Milieu 5</b>		Biophony	N=2	104.513	103.310			
		Biophony	N=1	5423.376	.			
		Biophony	N=1	103.821	.			
<b>Periode 5</b>	<b>Milieu 1</b>	Biophony	N=6	207.414	114.190			
		Biophony	N=1	283.630	.			
		Biophony	N=2	52.469	12.737			
	<b>Milieu 2</b>	Biophony	N=2	4235.185	3195.287			
		Biophony	N=7	955.084	981.326			
		Biophony	N=4	108.451	95.266			
<b>Periode 6</b>	<b>Milieu 3</b>	Biophony	N=3	469.959	519.090			

Site	3	Periode	1	Milieu	1	Biophony	N=1	302.004	.
					2	Biophony	N=3	282.424	79.784
					3	Biophony	N=2	231.334	62.131
		2		Milieu	1	Biophony	N=4	337.942	127.952
					2	Biophony	N=1	474.690	.
		3		Milieu	3	Biophony	N=1	763.847	.
					4	Biophony	N=2	10.885	.218
					5	Biophony	N=1	1161.680	.
		4		Milieu	1	Biophony	N=3	502.249	433.119
					2	Biophony	N=1	155.652	.
					3	Biophony	N=2	480.643	520.046
					4	Biophony	N=2	12.324	1.898
					5	Biophony	N=3	563.977	412.450
		5		Milieu	1	Biophony	N=2	235.894	232.729
		6		Milieu	1	Biophony	N=1	1021.595	.
					2	Biophony	N=1	3105.097	.
					3	Biophony	N=2	950.116	927.911

**Tableau 3.2.** Résultats des échantillons en fonction des variables « période » et « milieu » pour chacun des sites

## Tableaux croisés

Tableau croisé Milieu \* Periode

Effectif

Sites		Periode						Total
		1	2	3	4	5	6	
1	Milieu 1	0	3	3	1	1	0	8
	2	1	0	1	1	2	2	7
	3	8	1	1	2	3	4	19
	5	0	0	3	2	2	0	7
	Total	9	4	8	6	8	6	41
2	Milieu 1	2	5	1	6	2	0	16
	2	3	0	0	1	7	4	15
	3	1	2	1	0	0	3	7
	5	2	2	0	2	0	0	6
	Total	8	9	2	9	9	7	44
3	Milieu 1	1	4	0	3	2	1	11
	2	3	1	0	1	0	1	6
	3	2	0	1	2	0	2	7
	4	0	0	2	2	0	0	4
	5	0	0	1	3	0	0	4
Total	6	5	4	11	2	4	32	

### 3.2 La biophonie et la biodiversité

La biophonie des différents milieux a été mesurée sur le terrain à l'aide des appareils d'enregistrement, alors que les mesures de biodiversité renvoient à des inventaires avicoles faits par des ornithologues et scientifiques (dans le cas de l'Ile d'Anticosti, il s'agit d'un inventaire rapporté par Éric Savard, responsable de la conservation et de l'éducation du parc national de l'Ile d'Anticosti effectué à l'été 2008). Dans le but de déterminer s'il est possible d'associer la biophonie à la biodiversité en milieu tropical, nous avons sélectionné des milieux pour lesquels nous connaissons le nombre d'espèces d'oiseaux et pour lesquels nous avons estimé la biophonie.

Nous avons donc utilisé les valeurs de biophonie de deux projets de recherche antérieurs afin de répondre à cet objectif. Dans un premier temps, nous avons pris les valeurs maximales de biophonie enregistrées en région boréale dans le domaine de la sapinière à bouleaux blanc de l'Est (ULaval, 2010) dans le parc national de l'Ile-d'Anticosti, Québec (projet réalisé par Marie-Claude Provost, Anticosti été 2009). Les données (n= 13 pour le milieu à l'étude) ont été récoltées au mois d'août 2009 à proximité d'un écotone forestier et selon la même technique d'échantillonnage utilisée pour le projet fait en milieu tropical. Un inventaire faunique réalisé au cours de la même période révèle que le milieu boréal dans lequel les échantillons ont été prélevés accueille 167 espèces d'oiseaux (Inventaire Anticosti, 2008). Les valeurs de biophonie (dB/Hz) amassées correspondent aux moyennes des valeurs maximales récoltées entre le 10 et le 15 août 2009 dans un milieu qualifié d'écotone dans le secteur Vauréal de l'Ile d'Anticosti.

**Tableau 3.3.** Résultats des valeurs de biophonie prélevées en zone tempérée nordique à l'Isle-aux-Grues, zone boréale à l'Île d'Anticosti et en milieu tropical dans le biome de la *Mata Atlântica* (\*10<sup>5</sup>)

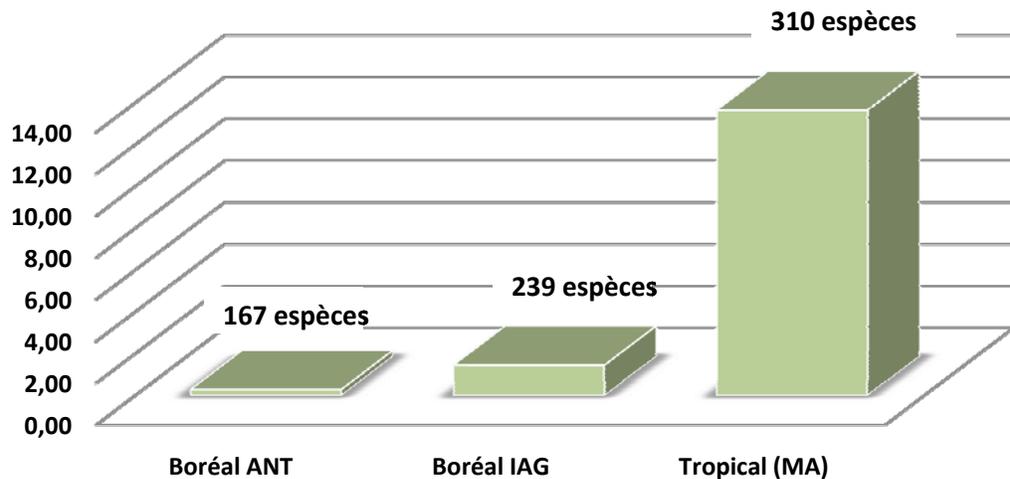
	<i>Tempérée nordique IAG</i>	<i>Boréale ANT</i>	<i>Tropical (MA)</i>
1	3.9661	0.0122	24.6543
2	0.3523	0.3766	21.2333
3	0.2041	0.2436	6.9098
4	0.6688	0.0011	5.6787
5	4.0152	0.4456	13.2632
6	0.4522	0.1232	27.4563
7	0.1923	0.2321	13.4431
8	3.1877	0.3233	12.3678
9	0.1895	0.1212	27.5509
10	0.2629	0.8767	1.2366
11	0.2457	0.0021	6.5667
12	4.7443	0.7656	11.2376
13	0.3842	0.1178	5.6786
<b>Moyenne</b>	<b>1.4512</b>	<b>0.2801</b>	<b>13.6367</b>

Les valeurs correspondant à la zone tempérée nordique de l'Isle-aux-Grues ont été récoltées par Isabelle Laporte en septembre 2004, Québec (Laporte, 2005). Les valeurs de biophonie ont servi à réaliser un projet d'étude visant à comparer la biophonie d'un milieu rural et d'un milieu urbain. L'inventaire avicole réalisé par Environnement Canada (Environnement Canada, 2008) révèle la présence de 239 espèces d'oiseaux pour ces dates. Ces données représentent également la moyenne des valeurs maximales récoltées dans un milieu d'écotone mais cette fois-ci à l'aide d'une station d'enregistrement permanente qui prélevait automatiquement 30 secondes de son chaque 30 minutes (méthodologie utilisée dans le travail de Laporte, 2005). Les échantillons ont été prélevés entre le 9 et le 16 septembre 2004.

Pour ce qui est des valeurs correspondant au milieu tropical, elles ont été récoltées dans un milieu d'écotone entre le 22 juin et le 11 juillet 2009, période correspondant à la fin de l'automne et au début de l'hiver brésilien, dans le domaine de la forêt ombrophile dense de la *Mata Atlântica*, Brésil. Les derniers inventaires fauniques effectués par l'UNESCO (UNESCO, 2010) indiquent que 1622 espèces d'oiseaux sont présentes dans le biome de la *Mata Atlântica*. Or, les inventaires effectués au parc national de la Serra do Itajaí, région à proximité des sites étudiés, révèlent la présence de 310 espèces présentes (Plano de manejo PNSI, 2008).

En observant l'histogramme représenté à la figure 3.1, nous remarquons que la biophonie est plus élevée lorsque le nombre d'espèces augmente. Pour un nombre de 167 espèces d'oiseaux en milieu boréal à l'île d'Anticosti, nous retrouvons un indice moyen de biophonie de 0.28 dB/Hz, alors que pour l'île-aux-Grues où l'on retrouve 239 espèces d'oiseaux, l'indice de biophonie moyen était de 1.45 dB/Hz. En milieu tropical, l'on observe une biodiversité correspondant à 1622 espèces au total (mais 310 sur le territoire échantillonné) pour un indice moyen de biophonie de 13.64 dB/Hz.

### Biodiversité (nombre d'espèces d'oiseaux ) et biophonie (puissance en dB/Hz)



**Figure 3.1.** La biodiversité et la moyenne de biophonie (dB/Hz) exposés à différents milieux.

En rapportant ces valeurs sur le graphique présenté à la figure 3.2, il est possible de constater la relation directe entre la biophonie et la biodiversité ( $R^2 = 0,9988$ ). Comme nous n'avons seulement que trois milieux où la biophonie a été associée à la biodiversité, nous sommes conscients que cette valeur de  $R^2$  a peu de signification intrinsèque. Par contre, la tendance observée va dans le sens de notre hypothèse.

Pour sa part, la figure 3.3 illustre la relation biophonie/biodiversité mais sur un seul site du Brésil pour lequel nous avons l'inventaire spécifique des oiseaux et des batraciens. Ainsi, la biophonie moyenne des oiseaux (246,29 dB/Hz) est plus élevée que celle des batraciens (123,08), ce qui correspond à l'inventaire faunique réalisé dans le parc de *Spitzkopf* qui fait mention de 258 espèces d'oiseaux et, de 45 espèces de batraciens (*Plano de Manejo do PNSI, 2008*). Nous remarquons donc que la biophonie mesurée est ainsi liée aux différentes classes de biodiversité d'un même milieu, dans ce cas-ci le parc écologique de *Spitzkopf*.

## La biophonie en fonction de la biodiversité avicole

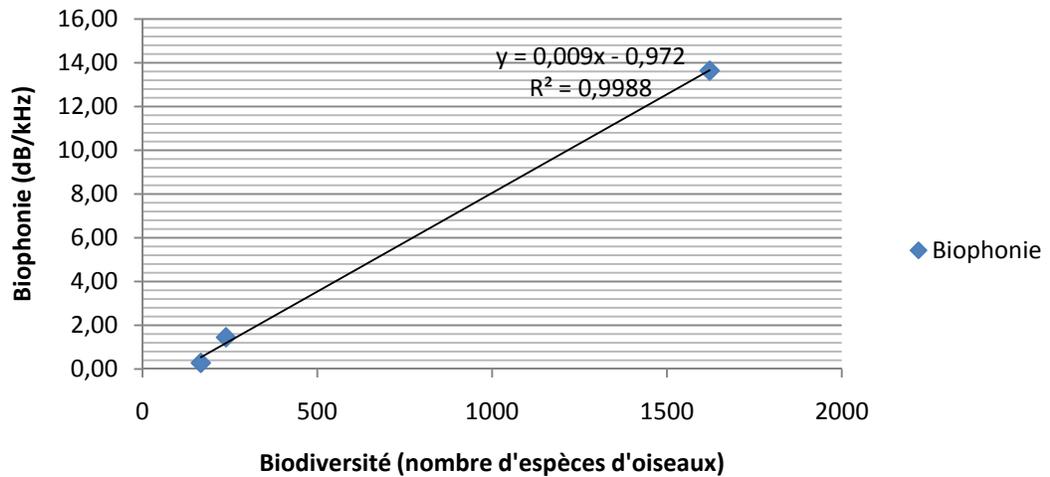


Figure 3.2. La biophonie (dB/Hz) en fonction de la biodiversité avicole

## Biophonie moyenne (dB/Hz) et biodiversité (nombre d'espèces) pour le site de Spitzkopf

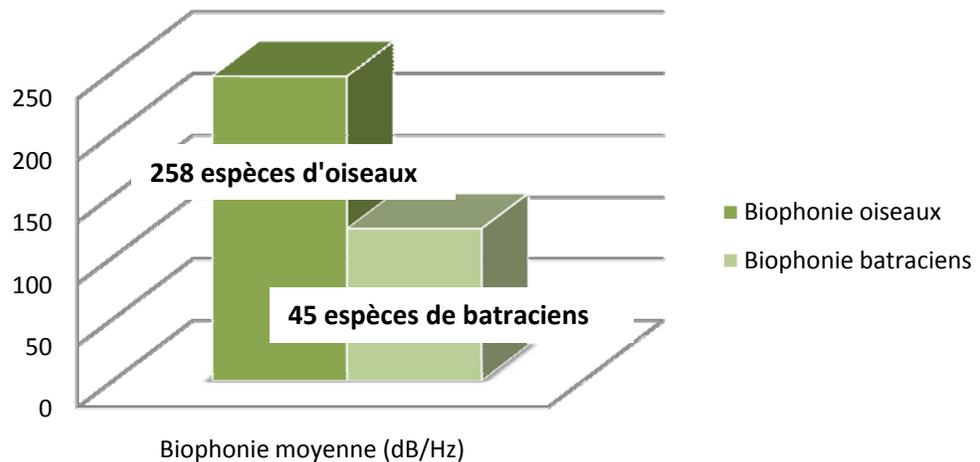
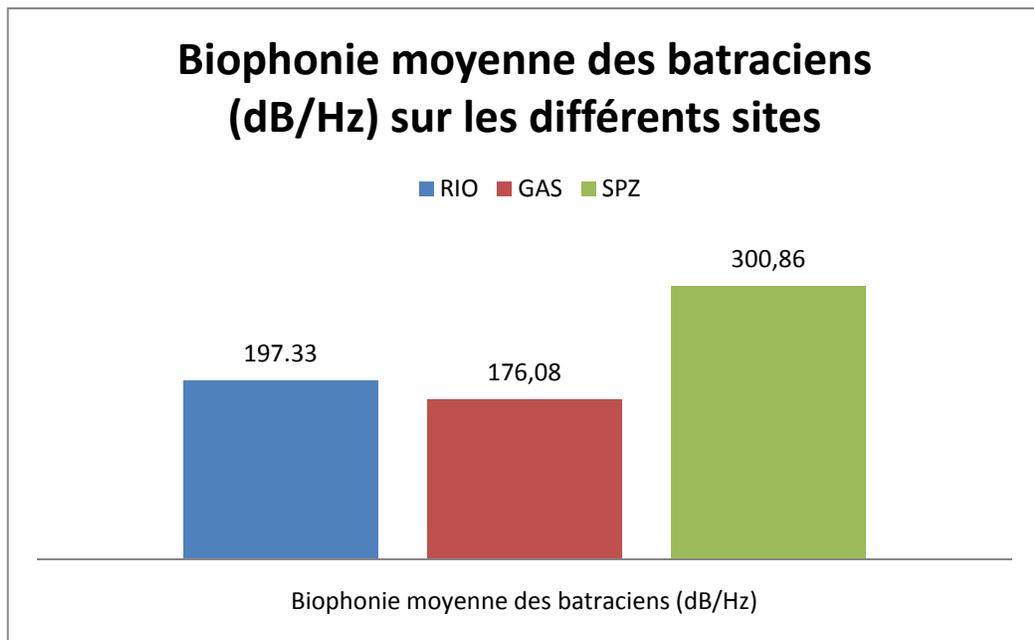
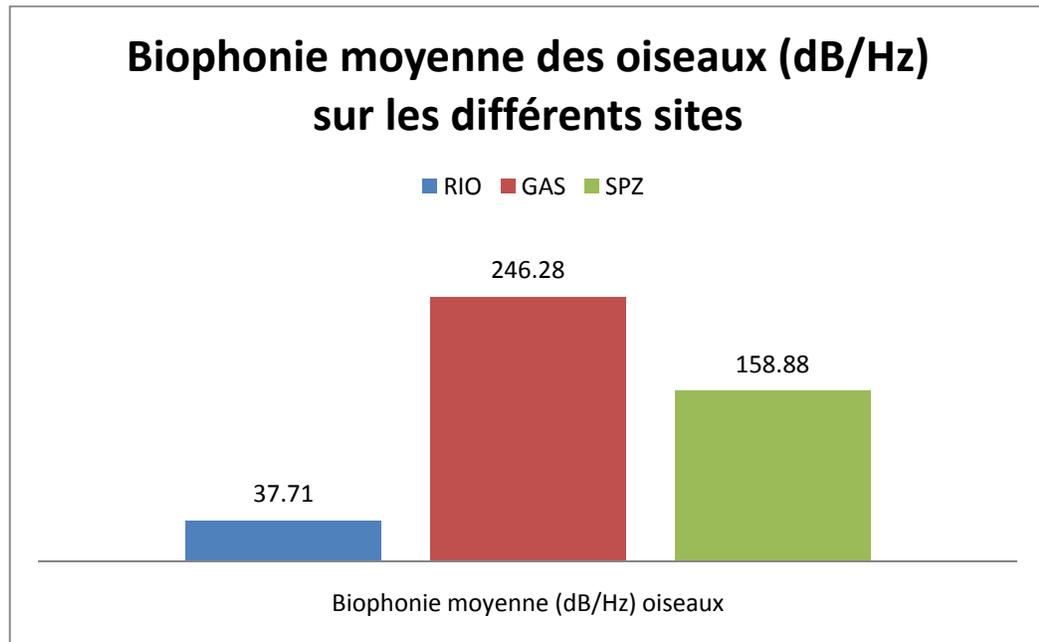


Figure 3.3. Biophonie moyenne (dB/Hz) et biodiversité (nombre d'espèces) dans le parc écologique de *Spitzkopf*.

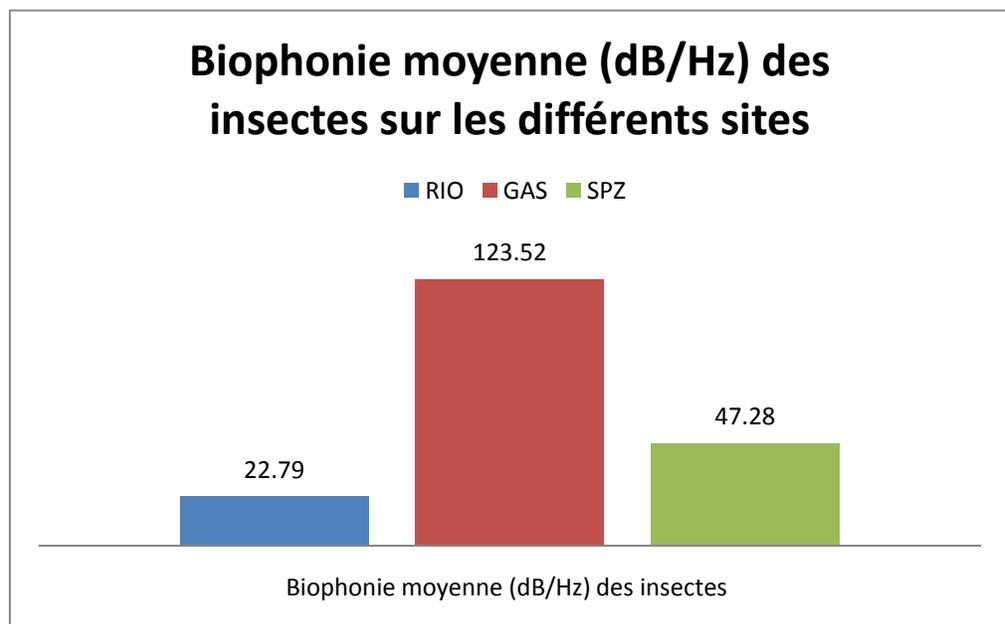
La biophonie moyenne (dB/Hz) a été calculée sur chacun des trois sites pour les oiseaux, les batraciens et les insectes. Les figures 3.4, 3.5 et 3.6 indiquent que le site de *Spitzkopf* est celui où l'on retrouve la plus grande biophonie attribuable aux batraciens (300,86 dB/Hz contre 197,339 dB/Hz pour RIO et 176,08 dB/Hz pour GAS). Pour les oiseaux, le site de Gaspar remporte la palme avec 246,29 dB/Hz et il en est de même pour ce qui est des insectes (GAS= 123,52; RIO= 22,79 et SPZ= 47,28).



**Figure 3.4.** Biophonie moyenne des batraciens enregistrée aux différents sites



**Figure 3.5.** Biophonie moyenne des oiseaux aux différents sites



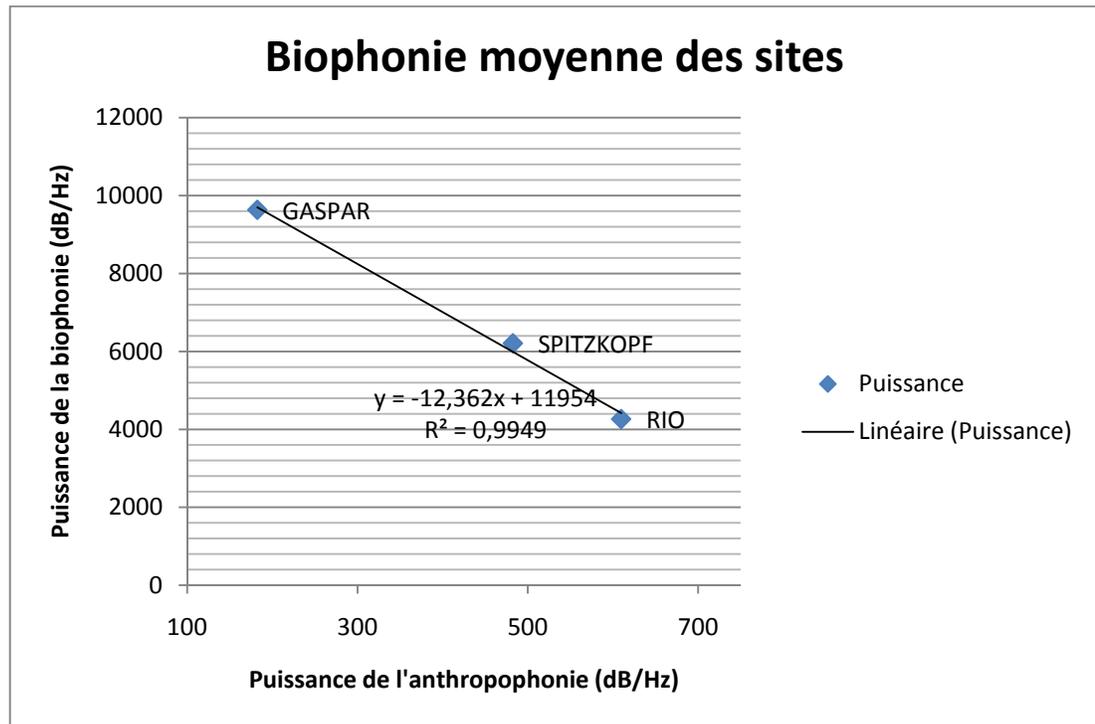
**Figure 3.6.** Biophonie moyenne des insectes aux différents sites

### 3.3 L'anthropophonie et la biophonie

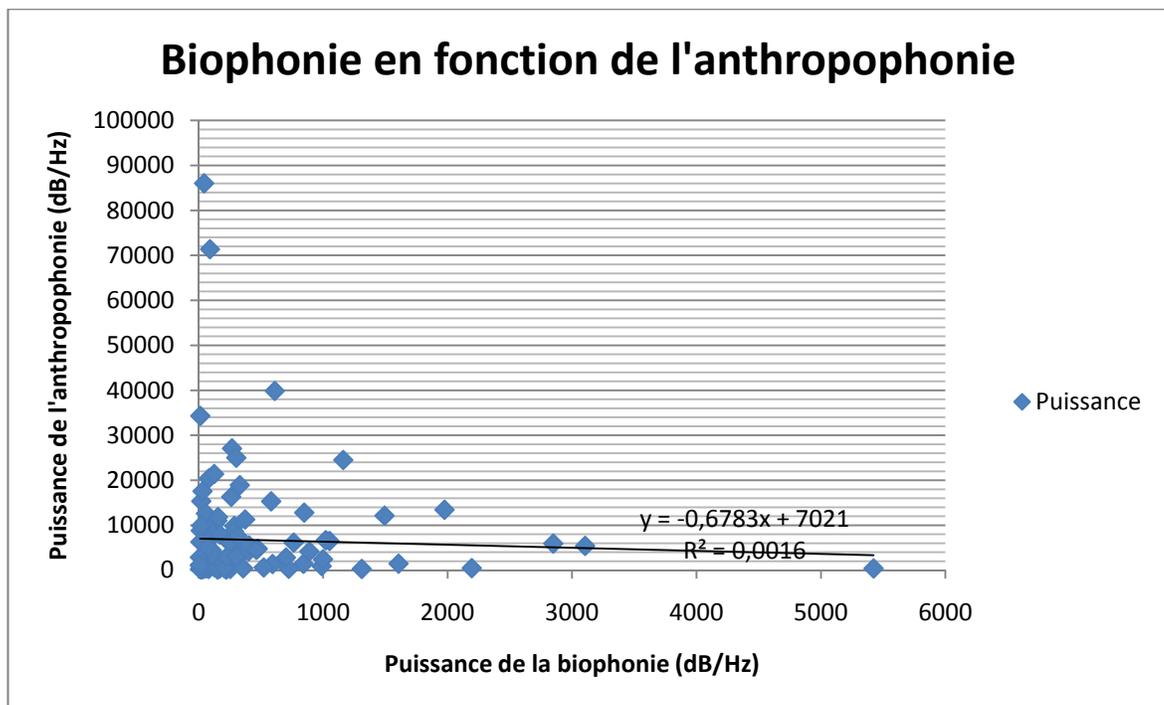
En comparant les moyennes d'anthropophonie pour l'ensemble des sites, nous remarquons que la moyenne d'anthropophonie est la plus élevée pour le site RIO qui est le seul territoire étudié non préservé. Vient ensuite le site SPZ qui est le parc écologique et ensuite la réserve naturelle de Gaspar (Figure 3.7). Aussi, nous remarquons que, en moyenne, la biophonie est plus élevée lorsque l'anthropophonie est moindre. Pour le site de RIO, l'anthropophonie est de 9633,925 dB/Hz alors que la biophonie est de 182,448 dB/Hz, ce qui donne un ratio biophonie/anthropophonie de 0,02. Dans le cas de SPZ, l'anthropophonie enregistrée est de 6208,085 dB/Hz pour une biophonie de 482,540 dB/Hz, le ratio biophonie/anthropophonie étant donc de 0,08. Pour sa part, le site GAS représentant la réserve de protection naturelle affiche une anthropophonie de 4263,932 dB/Hz et une biophonie de 609,681 pour un ratio total biophonie/anthropophonie de 0,15.

En calculant les coefficients du modèle linéaire de régression, nous constatons une association très forte mais négative entre la moyenne de biophonie et la moyenne d'anthropophonie émises sur les différents sites ( $R^2 = 0,9949$ ). Encore une fois, la valeur intrinsèque de ce résultat est relative.

Par contre, lorsque nous incluons toutes les valeurs de biophonie et d'anthropophonie émises pour chacune des périodes d'échantillonnage à tous les sites, nous n'observons aucune relation entre les deux variables. Le coefficient de corrélation linéaire n'est que de 0,0016. Il semble donc qu'il y ait une association générale et négative entre la biophonie et l'anthropophonie à chacun de nos sites, mais que cette association ne se réalise pas lorsque l'on considère chacun des enregistrements. C'est que les mesures élevées d'anthropophonie et de biophonie n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes périodes, elles ne sont pas concomitantes. On peut avoir une meilleure idée de ce que représente l'anthropophonie en considérant le nombre de visiteurs.

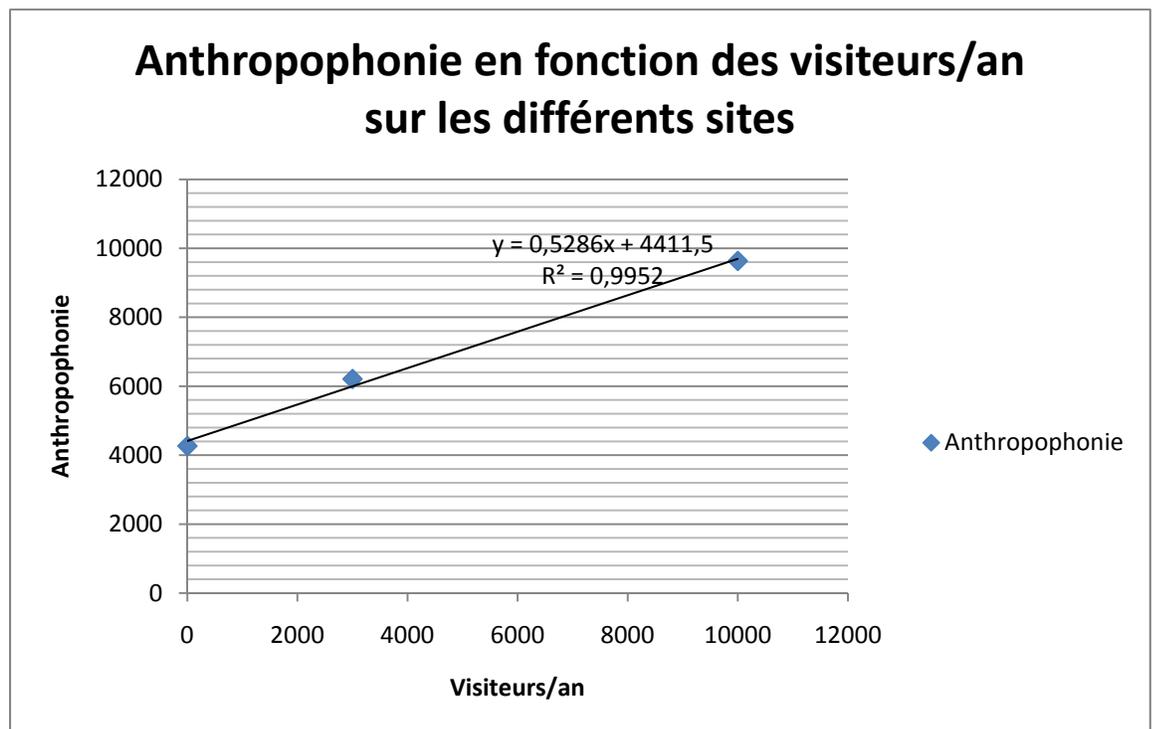


**Figure 3.7.** Biophonie moyenne en fonction de l'anthropophonie moyenne aux trois sites à l'étude



**Figure 3.8.** Association entre la biophonie et l'anthropophonie pour l'ensemble des échantillons toutes périodes et milieux confondus

Pour ce qui est de l'anthropophonie en fonction du nombre de visiteurs par année, les résultats présentés à la figure 3.9 démontrent un lien direct entre les deux variables ( $R^2=0,9952$ ). Plus le nombre de visiteurs est élevé sur un site, plus l'indice d'anthropophonie est élevé. Le site de RIO démontre un indice d'anthropophonie de 9633.92 dB/Hz et accueille environ 10000 visiteurs/an alors que le site de *Spitzkopf* affiche une anthropophonie de 6208,08 dB/Hz pour environ 3000 visiteurs par année. Le nombre de visiteurs du site de Gaspar est quant à lui établi à 0 puisque cette réserve naturelle n'est pas un site touristique.



**Figure 3.9.** Relation entre l'anthropophonie et le nombre de visiteurs/an

Un test statistique non-paramétrique de corrélation simple (Spearman) a été effectué sur les résultats de biophonie et d'anthropophonie selon les différentes périodes de la journée (tableau 3.4 et tableau 3.5). Dans chacun des cas, ce test s'avère non concluant excepté dans le cas de l'anthropophonie en fonction de la biophonie des oiseaux de type A (oiseaux chantant à des fréquences allant de 5000 à 8000 Hz et de milieux forestiers,

Viellard, 2000) à la période 6 (*dusk2*), où le coefficient de corrélation est significatif ( $r_s = 0,512$ ). Tous les autres coefficients de corrélation de Spearman ne démontrent aucun lien significatif entre l'anthropophonie et la biophonie aux différentes périodes.

**Tableau 3.4.** Résultats des corrélations de Spearman Biophonie/Anthropophonie (biophonie totale, biophonie des insectes de type A et B) effectuées pour l'ensemble des milieux et des périodes (logiciel *SPSS* version 17.0)

#### Corrélations

Periode				Biophony	InsecteAnf	InsecteBnf
1	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	-,014	-,125	,118
			Sig. (bilatérale)	,950	,571	,593
			N	23	23	23
2	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,038	,003	,230
			Sig. (bilatérale)	,880	,990	,358
			N	18	18	18
3	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,178	,099	,270
			Sig. (bilatérale)	,543	,737	,350
			N	14	14	14
4	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,212	,014	,152
			Sig. (bilatérale)	,298	,946	,458
			N	26	26	26
5	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	-,198	-,082	,056
			Sig. (bilatérale)	,416	,737	,819
			N	19	19	19
6	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,282	,265	,358
			Sig. (bilatérale)	,273	,305	,158
			N	17	17	17

**Tableau 3.5.** Résultats des corrélations de Spearman Biophonie/Anthropophonie (biophonie des oiseaux de type A et B, biophonie des batraciens) effectuées pour l'ensemble des milieux et des périodes (logiciel SPSS version 17.0) (suite)

#### Corrélations

Periode				OiseauAnf	OiseauBnf	Batraciensnf
1	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	-,088	,083	,197
			Sig. (bilatérale)	,690	,707	,368
			N	23	23	23
2	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,154	,267	,203
			Sig. (bilatérale)	,542	,284	,418
			N	18	18	18
3	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,165	,095	,169
			Sig. (bilatérale)	,573	,748	,563
			N	14	14	14
4	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,069	,296	,370
			Sig. (bilatérale)	,736	,142	,063
			N	26	26	26
5	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	-,105	-,170	-,367
			Sig. (bilatérale)	,668	,486	,123
			N	19	19	19
6	Rho de Spearman	Anthropo	Coefficient de corrélation	,512*	,453	,341
			Sig. (bilatérale)	,036	,068	,181
			N	17	17	17

\*. La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

### 3.4 Variabilité spatiale

Un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis (tableau 3.6) a été effectué pour voir si les *sites* échantillonnés présentent une différence significative entre eux en fonction des différents milieux dans lesquels les échantillons sonores ont été prélevés. Le test démontre, à un niveau d'erreur  $\leq 0.001$  ( $\alpha$ ), qu'il y a une différence significative de la valeur de la biophonie entre les différents milieux. Le même test, soit celui de Kruskal-Wallis, a été répété afin de vérifier s'il existe une différence significative entre les différents *milieux* retrouvés sur les sites (tableau 3.7). Le test démontre, à un niveau d'erreur de 0.01 ( $\alpha$ ), qu'il y a une différence significative de la valeur de la biophonie entre les différents milieux. Toutefois, comme les conditions d'application de ce test ne sont pas toutes respectées (interdépendance entre les milieux et les périodes), la validité de ces résultats pourrait être

contestée. C'est pourquoi nous analysons les moyennes de biophonie de l'ensemble des sites une à une.

**Tableau 3.6.** Résultats du test de Kruskal-Wallis pour l'anthropophonie et la biophonie des différents *sites* échantillonnés (logiciel *SPSS* version 17.0)

**Ranks**

	Sites	N	Mean Rank
Biophony	1	41	41.46
	2	44	65.57
	3	32	72.44
	Total	117	
Anthropophony	1	41	69.95
	2	44	40.20
	3	32	70.81
	Total	117	

**Test Statistics<sup>a,b</sup>**

	Biophony	Anthropophony
Chi-Square	17.632	21.665
df	2	2
Asymp. Sig.	.000	.000

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Sites

**Tableau 3.7.** Résultats du test de Kruskal-Wallis pour l'anthropophonie et la biophonie des différents *milieux* échantillonnés (logiciel *SPSS* version 17.0)

Ranks			
	Milieu	N	Mean Rank
Biophony	1	35	71.46
	2	28	63.29
	3	33	55.09
	4	4	2.75
	5	17	47.12
	Total	117	
Anthropophony	1	35	48.06
	2	28	62.00
	3	33	68.97
	4	4	59.00
	5	17	57.24
	Total	117	

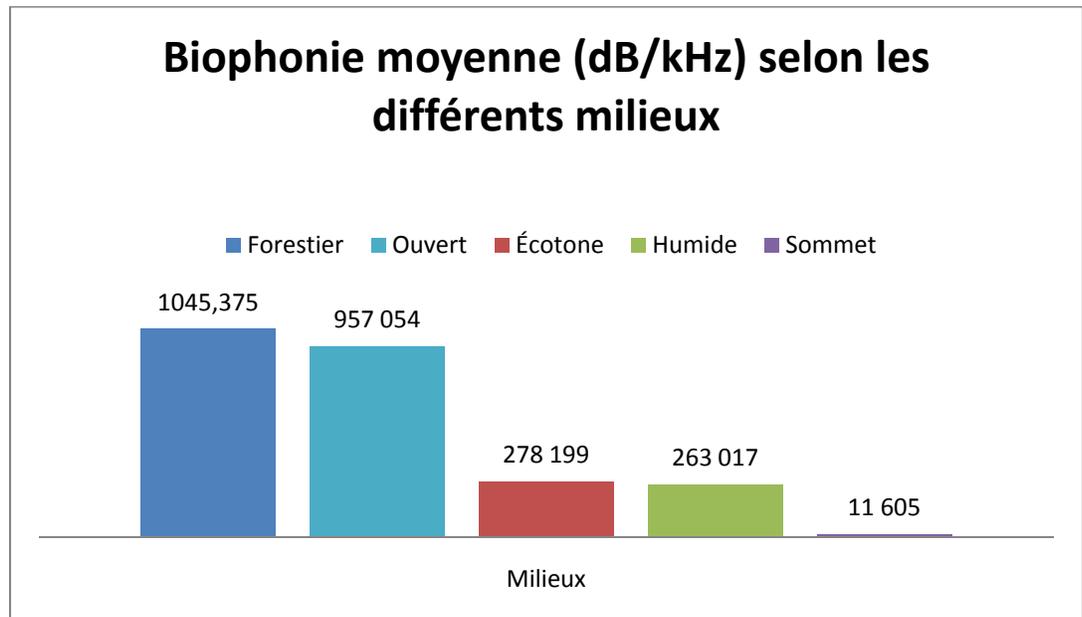
Test Statistics <sup>a,b</sup>		
	Biophony	Anthropophony
Chi-Square	18.693	6.759
df	4	4
Asymp. Sig.	.001	.149

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Milieu

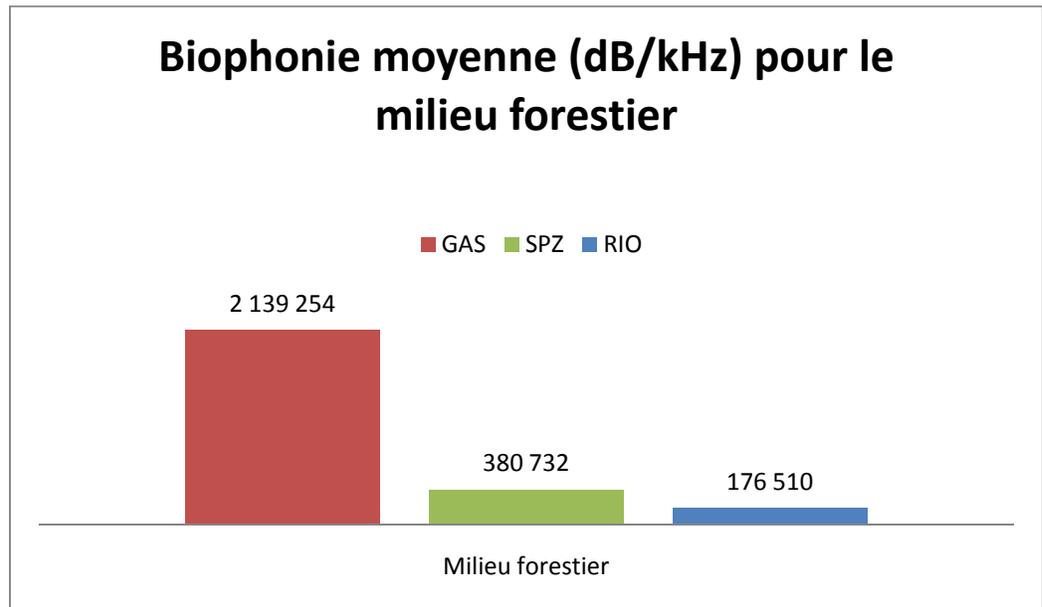
En calculant la moyenne de biophonie enregistrée sur chacun des sites toutes périodes confondues, nous obtenons les résultats présentés à la figure 3.10. Il est possible d'y observé que le milieu forestier est le milieu pour lequel la biophonie moyenne est la

plus importante avec 1045,375 dB/Hz, suivi du milieu ouvert (957,054 dB/Hz), du milieu écotone (278,199 dB/Hz), du milieu humide (263,017 dB/Hz) puis du milieu de sommet (11,605 dB/Hz). Le rapport entre les puissances maximale (1045,375 dB/Hz) et minimale (11,605 dB/Hz) est de 90,08.

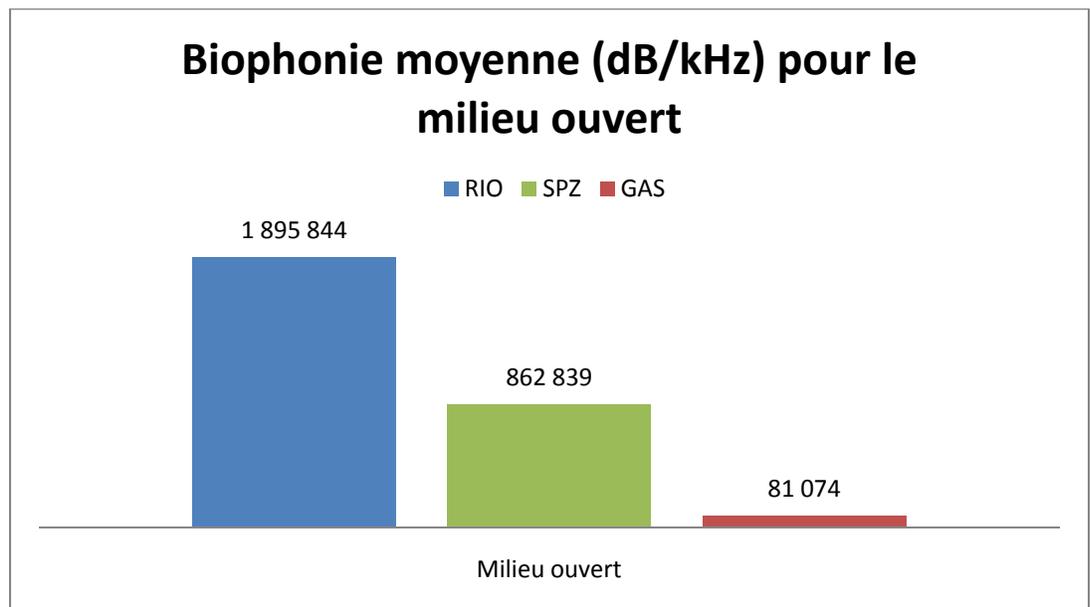


**Figure 3.10.** Biophonie moyenne selon les différents milieux

À la figure 3.11, on retrouve les résultats obtenus pour le milieu forestier. Ces derniers dénotent une prédominance de la biophonie sur le site de Gaspar avec 2139,54 dB/Hz, qui est suivi du parc de *Spitzkopf* (380,732 dB/Hz) et de RIO (176,510 dB/Hz). Tel qu'illustré à la figure 3.12, la biophonie moyenne (dB/kHz) enregistrée pour le milieu ouvert est la plus élevée sur le site non préservé de *Rio da Prata* (1895,844 dB/Hz). Viennent ensuite le site de *Spitzkopf* (862,839 dB/Hz) et la réserve naturelle de Gaspar (81,074 dB/Hz).



**Figure 3.11.** Biophonie moyenne pour le milieu forestier



**Figure 3.12.** Biophonie moyenne pour le milieu ouvert

En ce qui concerne les milieux humide, d'écotone et de sommet, nous ne pouvons faire ce même genre de comparaison puisque nous ne pouvons comparer la biophonie prélevée sur un même milieu à une même période. Le meilleur exemple est le cas du milieu de sommet qui est seulement rencontré dans le parc écologique de *Spitzkopf*.

### 3.5 Variabilité temporelle

Tout comme pour la variabilité entre les milieux, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été effectué pour voir si les sites présentent une différence significative entre eux en fonction de la période (tableau 3.8). Le test démontre à un niveau d'erreur de 0.01 ( $\alpha$ ) qu'il y a une différence significative dans la biophonie entre les différentes périodes. Or, comme on l'a vu précédemment, les conditions d'application de ce test ne sont pas toutes respectées (interdépendance entre les milieux et les périodes), la validité de nos résultats se voit amoindrie. C'est pourquoi nous voyons ici aussi en détail chaque séparément.

**Tableau 3.8.** Résultats du test de Kruskal-Wallis pour l'anthropophonie et la biophonie des différentes périodes échantillonnés (logiciel *SPSS* version 17.0)

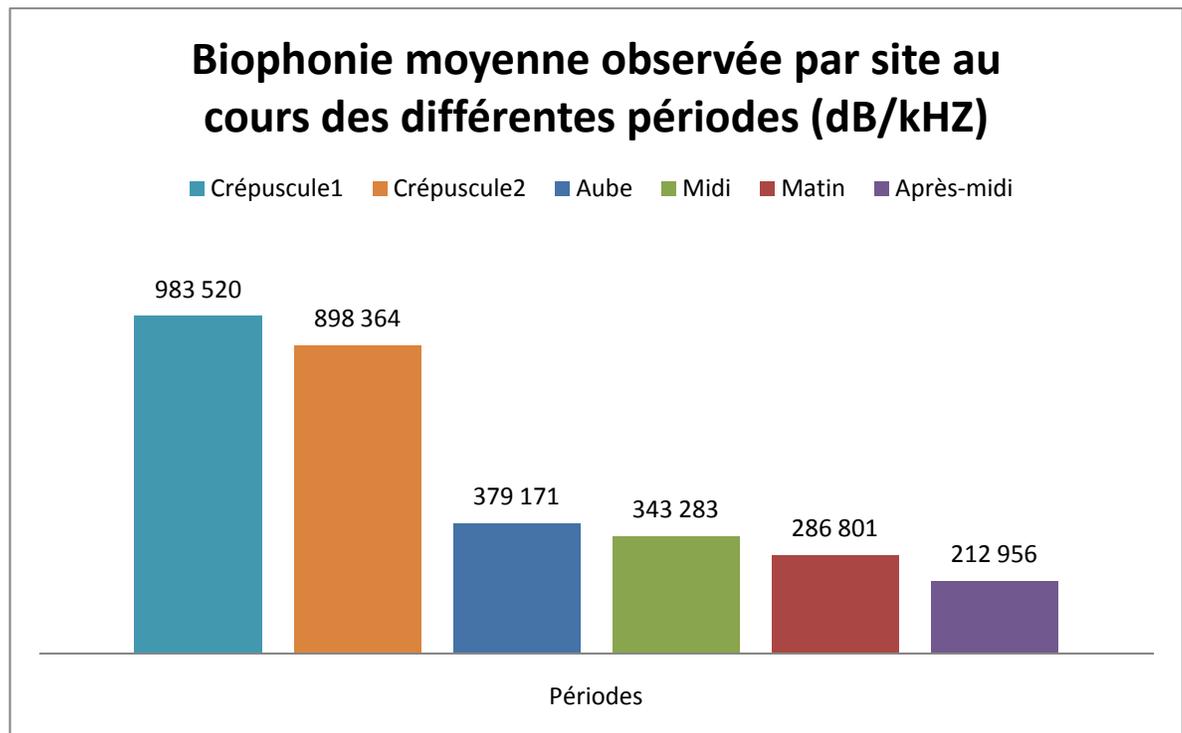
Ranks			
	Periode	N	Mean Rank
Biophony	1	23	52.83
	2	18	68.11
	3	14	50.00
	4	26	53.15
	5	19	68.21
	6	17	63.76
	Total	117	
Anthropophony	1	23	54.74
	2	18	52.67
	3	14	64.29
	4	26	55.38
	5	19	67.16
	6	17	63.53
	Total	117	

	Biophony	Anthropophony
Chi-Square	5.555	3.028
df	5	5
Asymp. Sig.	.008	.000

a. Kruskal Wallis Test

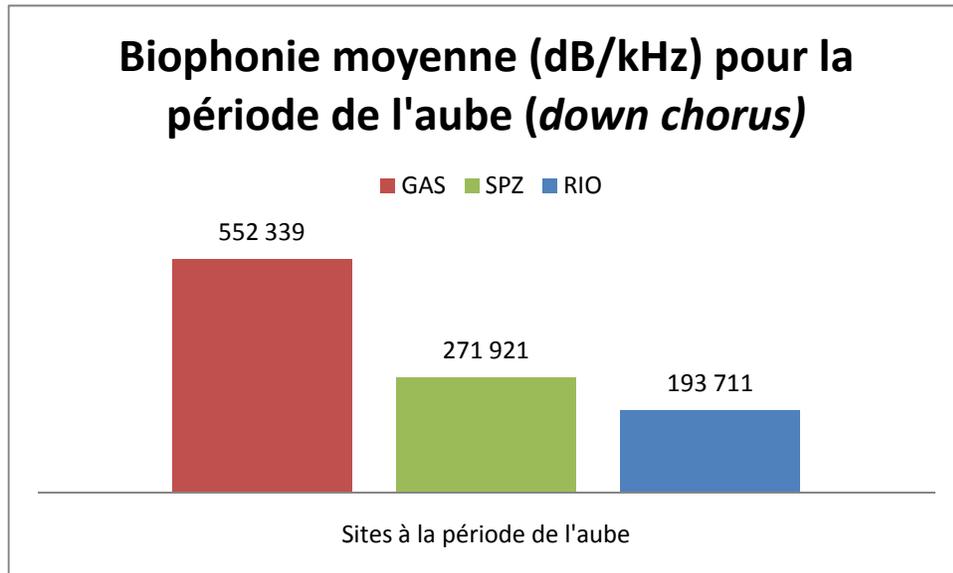
b. Grouping Variable: Periode

Les résultats présentés à la figure 3.13 révèlent une biophonie plus importante lors des périodes qui correspondent respectivement au crépuscule1 et crépuscule2. Vient ensuite la période de l'aube (*down chorus*), suivie par le midi, le matin et l'après-midi. Le rapport entre les puissances maximale (983,520 dB/Hz) et minimale (212,956 dB/Hz) est de 4,61.



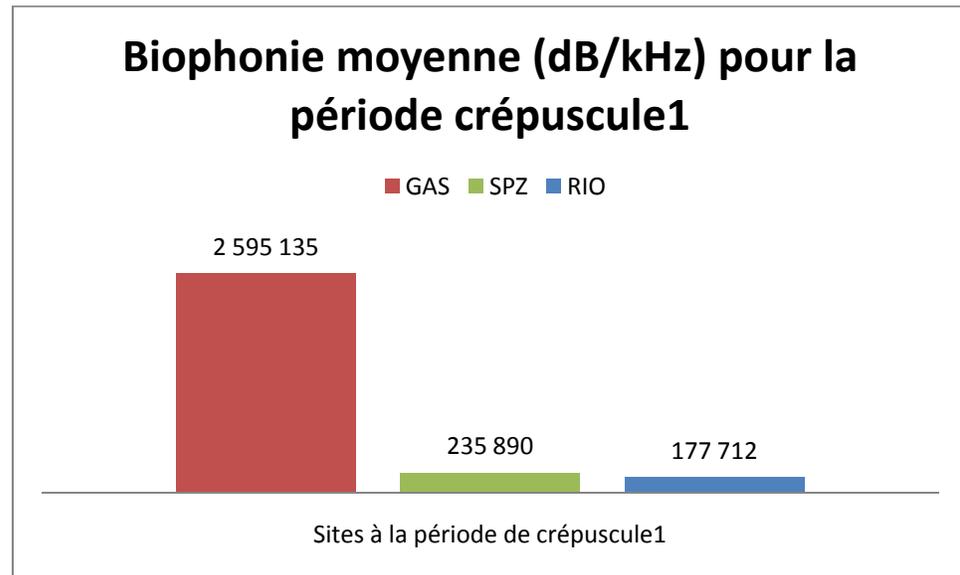
**Figure 3.13.** Biophonie moyenne enregistrée à chaque site pour chacune des périodes

L'histogramme présenté à la figure 3.14 fait état d'une biophonie moyenne plus élevée dans la réserve naturelle de Gaspar pour la période de *down chorus* avec une valeur de 552,339 dB/Hz.



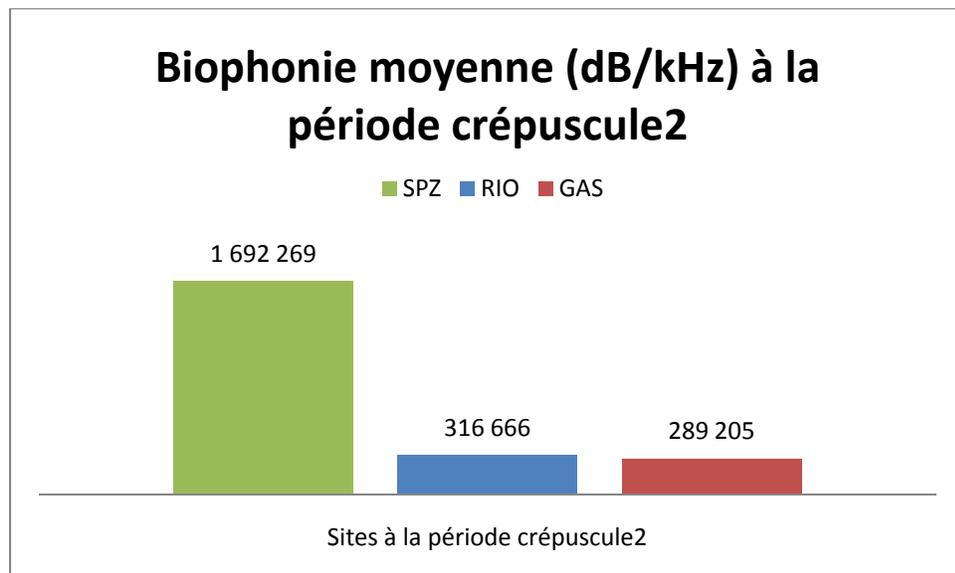
**Figure 3.14.** Biophonie moyenne enregistrée au cours de la période aube

Comme l'indique la figure 3.15, c'est également dans la réserve de Gaspar que l'on enregistre la biophonie moyenne la plus élevée au cours de la période du crépuscule<sup>1</sup>. Vient en second lieu le parc écologique de *Spitzkopf* avec une moyenne de 235,890 dB/Hz puis le site non protégé de la *Pousada Rio da Prata* au dernier rang avec une biophonie moyenne de 177,712 dB/Hz. Donc pour les deux périodes les plus critiques (aube et crépuscule), c'est le site de la plus haute biodiversité et le moins perturbé qui enregistre le plus de biophonie.



**Figure 3.15.** Biophonie moyenne pour la période crépuscule1

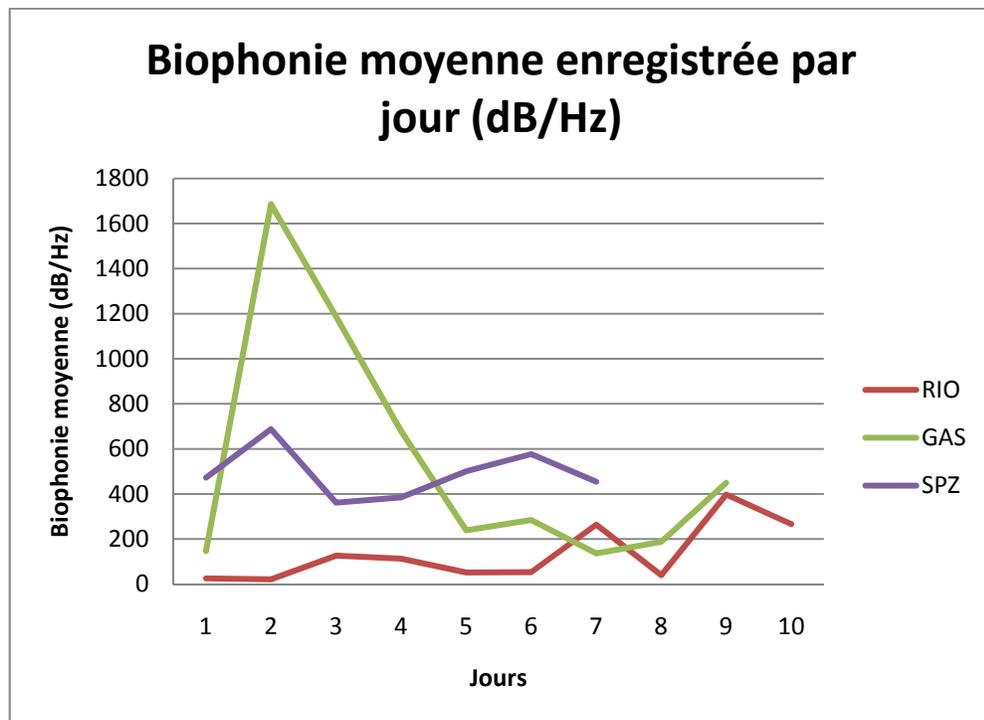
En ce qui a trait aux résultats de biophonie moyenne enregistrés pour la période de crépuscule2, le maximum est rencontré sur le site de *Spitzkopf* (1692,269 dB/Hz), comme l'illustre la figure 3.16. Rappelons également que le maximum de biophonie de batraciens est également enregistré pour ce site (figure 3.4)



**Figure 3.16.** La biophonie moyenne à chaque site pour la période crépuscule2

### *Série temporelle*

Pour compléter l'analyse de l'effet de la période, une série temporelle a aussi été effectuée en fonction des jours consécutifs de prélèvement des échantillons sonores plutôt que de ne considérer que les heures de la journée (figure 3.17). Dans le cas de RIO, le jour 1 correspond au 14 juin 2009, le jour 2 au 15 juin 2009 et ainsi de suite pour les autres jours. Le jour 1 pour le site de GAS correspond au 25 juin 2009 alors que pour SPZ il correspond au 6 juillet 2009. Nous remarquons que la biophonie moyenne (dB/Hz) atteint une valeur maximale au jour 2 (1686, 22 dB/kHz) sur le site de GAS, alors que la valeur minimale enregistrée est sur le site de RIO avec 21,15 dB/Hz. De manière générale, la biophonie n'a pas tendance à augmenter ou diminuer en fonction des journées qui avancent.



**Figure 3.17.** La biophonie moyenne enregistrée au fil des jours (consécutifs) à l'ensemble des sites.

### 3.6 Sommaire des résultats

Les principaux résultats obtenus au cours de cette étude sont :

#### Statistiques descriptives

1. L'interdépendance des variables entre elles et les valeurs manquantes dans le tableau croisé des périodes et des milieux sur chaque site ne permet pas de faire des tests statistiques sur l'ensemble de nos variables. Nous devons donc faire des statistiques descriptives avec la biophonie moyenne enregistrée à chaque variable.

#### Biophonie et biodiversité (tableau 3.3 - figures 3.1 à 3.6)

1. La biophonie (dB/Hz) augmente de façon significative lorsque la biodiversité représentée par le nombre d'espèces d'oiseaux augmente dans les différentes formations végétales (milieu boréal, mixte et tropical).
2. La biophonie propre à un groupe taxonomique est plus élevée lorsque le nombre d'espèces propre à ce même groupe retrouvé sur le site est plus grand. Tel est le cas observé dans le parc écologique de *Spitzkopf* où nous avons les valeurs de biodiversité pour les oiseaux et batraciens, de même que des valeurs de biophonie pour ces mêmes groupes taxonomiques.
3. C'est sur le site du parc écologique de *Spitzkopf* que l'on a enregistré la valeur de biophonie moyenne (dB/Hz) liée au groupe des batraciens maximale.
4. Les valeurs de biophonies maximales moyennes (dB/Hz) pour les groupes des insectes et des oiseaux ont toutes deux été enregistrées sur le site de la réserve naturelle de Gaspar.

#### Anthropophonie et biophonie (tableaux 3.4 et 3.5 - figures 3.7 à 3.9)

1. La valeur d'anthropophonie moyenne (dB/Hz) maximale a été enregistrée sur le site non protégé de la *Pousada Rio da Prata*. De même, la biophonie moyenne y était aussi la plus faible.

2. Il existe une corrélation très forte et négative entre la biophonie moyenne associée à chacun des sites et l'anthropophonie moyenne de ce même site. Plus l'anthropophonie augmente, plus la biophonie se voit réduite.
3. Les résultats de régression linéaire ne démontrent aucun lien direct entre l'anthropophonie et la biophonie lorsque l'ensemble des valeurs sont considérées. Ce n'est qu'en moyenne (sur différentes périodes et considérant différents milieux) que la relation existe.
4. Le ratio biophonie/anthropophonie du site non protégé de la *Pousada Rio da Prata* équivaut à 0,02, celui du parc écologique de *Spitzkopf* à 0,08 et celui de la réserve naturelle à 0,15. Il y a donc un gradient de protection des milieux qui s'inscrit dans le ratio biophonie/anthropophonie.
5. La valeur moyenne d'anthropophonie d'un même site est directement liée aux nombres de visiteurs/année fréquentant ce même site. Plus il y a de visiteurs, plus l'anthropophonie moyenne enregistrée est élevée.

#### Variabilité spatiale de la biophonie (tableaux 3.6 et 3.7 - figures 3.10 à 3.12)

1. Les résultats démontrent une différence significative dans la biophonie moyenne (dB/Hz) des différents milieux.
2. Le milieu forestier est le milieu pour lequel la biophonie moyenne (dB/Hz) enregistrée est maximale, alors que le milieu de sommet est celui où l'on a enregistré une biophonie moyenne minimale.
3. Pour le milieu forestier, toutes périodes confondues, la biophonie moyenne maximale est enregistrée sur le site de la réserve naturelle de Gaspar.
4. Pour le milieu ouvert, toutes périodes confondues, les résultats démontrent une biophonie moyenne maximale sur le site de la *Pousada Rio da Prata*.

Variabilité temporelle de la biophonie (tableau 3.8 - figures 3.13 à 3.17)

1. Les valeurs de biophonies moyennes enregistrées démontrent l'existence d'une différence significative entre les différentes périodes.
2. Les périodes ayant la plus grande biophonie moyenne enregistrée sur l'ensemble des sites sont les périodes 5 et 6 qui correspondent respectivement aux *dusk1* et *dusk2*.
3. La biophonie minimale a été enregistrée au cours de la période 4 qui correspond à *afternoon*.
4. Les biophonies moyennes maximales pour les périodes 1 (*down chorus*) et 5 (*dusk1*) ont toutes deux été enregistrées sur le site de Gaspar, alors que la biophonie moyenne maximale pour la période 6 (*dusk2*) a été enregistrée sur le site du parc écologique de *Spitzkopf*.
5. Les résultats d'une série temporelle effectuée ne dénotent aucun lien entre le premier jour et le dernier jour de la prise des résultats (période s'échelonnant sur 26 jours). La biophonie varie davantage en fonction du site où elle est prélevée que de la journée et varie d'une journée à l'autre sur le même site mais pas de façon attendue.

## Chapitre 4. Discussion

### 4.1 Relation entre la biophonie et la biodiversité en milieu tropical

Les résultats obtenus en ce qui concerne la relation entre la biodiversité et la biophonie prélevées dans divers milieux permettent de répondre adéquatement à l'objectif principal de ce projet qui est de confirmer une association entre la biophonie (chants d'oiseaux), à des événements biologiques (richesse spécifique animale) en quantifiant les sons émis par les espèces d'un milieu tropical.

Les résultats obtenus vont dans le même sens que notre hypothèse de départ qui stipule que plus la biodiversité, soit le nombre d'espèces animales, est importante, plus l'indice de biophonie obtenu est grand. C'est ce que nous avons remarqué en comparant la biodiversité et la biophonie en milieu boréal et tropical. Plus le nombre d'espèces d'oiseaux est élevé, plus l'indice de biophonie est important. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus dans les travaux de Gage et Laporte en 2005 où la biophonie d'un milieu urbain était comparée à celle retrouvée en milieu rural (Laporte, 2005).

En proportion, le nombre d'espèces d'oiseaux retrouvées à l'Isle-aux-Grues est de 239, pour un indice de biophonie de 1,45; pour l'Ile d'Anticosti, l'on retrouve 167 espèces pour un indice de 0,28 et en milieu tropical, l'indice est de 13,64 pour 1622 espèces. En comparant le ratio entre le milieu boréal de l'Isle-Aux-Grues et celui en milieu tropical, on remarque un rapport de 9,41 ( $13,64/1,45$ ) pour la biophonie et de 5,11 ( $1222/239$ ) pour la biodiversité. Ces résultats mettent en évidence le lien entre la biophonie et la biodiversité, et ce, même en milieu tropical où le bassin de biodiversité est élevé. L'application *Biophonie*© est donc efficace pour faire le suivi de la biodiversité par la biophonie dans un milieu très riche en espèces.

L'application a également fait ses preuves dans le parc écologique de *Spitzkopf* où un relevé de biodiversité avait été effectué. Comme l'application *Biophonie*© permet de distinguer les fréquences émises par différents groupes taxonomiques (oiseaux, insectes et batraciens), il a été possible d'associer la biophonie totale émise par les oiseaux à l'inventaire aviaire de même que la biophonie des batraciens aux indices de biophonie respectifs. Les résultats obtenus sont en faveur de l'hypothèse émise et démontrent qu'il est possible d'associer une biophonie spécifique à la biodiversité spécifique puisque l'indice de biophonie était plus élevé pour les oiseaux (246,29 dB/Hz) que celle des batraciens (123,08), ce qui correspond à l'inventaire faunique réalisé dans le parc de *Spitzkopf* qui fait mention de 258 espèces d'oiseaux et, de 45 espèces de batraciens.

Aussi, les résultats montrent que les biophonies maximales moyennes pour les groupes taxonomiques des insectes et des oiseaux ont toutes deux été enregistrées sur le site de Gaspar, là où la plus haute richesse spécifique pour l'ensemble des groupes a été prélevée. Pour sa part, la biophonie moyenne pour le groupe des batraciens a été enregistrée sur le site du parc écologique de *Spitzkopf*, le même site pour lequel la biophonie maximale a été enregistrée à la période critique de chant des batraciens (crépuscule2).

La normalité n'étant pas rencontrée dans la distribution des valeurs de biophonie en raison de multiples valeurs extrêmes, un questionnement a été soulevé. En se penchant de plus près sur la technique utilisée dans l'application *Biophonie*©, l'on remarque que le calcul de la densité spectrale de puissance (DPS) se fait par une évaluation du signal par la transformée de Fourier et que cette dernière pourrait fausser les estimations de l'énergie contenue dans le spectre sonore.

En décortiquant l'énergie totale dégagée dans un système, l'on remarque que cette dernière correspond à la somme moyenne du carré de la Transformée de Fourier et que de hautes amplitudes ont pour effet de rehausser significativement la valeur de l'indice (Quinquis, 2000). Ainsi, si un bruit considérablement fort est émis à un moment pris en considération dans le calcul, ce dernier affectera la valeur de la DSP pour l'ensemble des fréquences analysées. Il en est de même si plusieurs individus appartenant à une même espèce chantent en même temps, ce qui cause alors une superposition des fréquences dans

une même bande sonore, ou encore si les individus chantent plus près du capteur sonore. (Quinquis, 2000)

Dans notre cas, comme l'expérimentateur ne restait pas sur les lieux lors de l'échantillonnage, il ne pouvait contrôler la proximité entre les individus et le capteur sonore. Or, la distance est à considérer dans le calcul de l'amplitude des ondes acoustiques puisque l'intensité du son est inversement proportionnelle à la distance de la source sonore ( $P/4\pi r^2$ , où P représente la puissance et r la distance à la source). L'étude effectuée par Catalina Bonilla au département de géographie de l'Université de Montréal a d'ailleurs démontré l'influence de la distance sur l'indice de biophonie, ce dernier étant beaucoup plus élevé lorsque le capteur sonore se trouvait à proximité de la source (Bonilla, 2010).

Bien que l'application *Biophonie*© nous permette déjà de faire l'association positive de la biophonie à la biodiversité, il serait tout de même intéressant de prendre en compte les mesures d'entropie relative et de dissimilitude tel que le propose les travaux de Sueur (2008). Ces deux mesures pourraient ainsi être ajoutées à l'application *Biophonie*©, ce qui réduirait considérablement les valeurs extrêmes de l'indice de biophonie probablement liées à la distance entre la source sonore et le capteur, de même qu'à la superposition des tonalités en présence de plusieurs individus de la même espèce. Quoiqu'il en soit, l'application *Biophonie*© est valide dans son état actuel, mais ces propositions permettraient d'en améliorer l'efficacité en milieu tropical.

Il est donc possible de vérifier l'objectif suivant qui est d'évaluer l'impact de l'anthropophonie sur la biophonie, et donc de l'anthropisation sur la biodiversité, en fonction des différents niveaux de protection du territoire.

## 4.2 Anthropophonie et biophonie

Tel que stipulé dans notre hypothèse de départ, l'anthropophonie d'un milieu est fortement liée au niveau de conservation de ce même milieu. Les résultats ont démontré que le site non conservé de la *Pousada Rio da Prata* est le site où l'anthropophonie, donc l'ensemble des sons émis par l'Homme, est la plus élevée, et en l'occurrence, le site où la

biophonie est moindre. Ce fait peut s'expliquer par l'hypothèse déjà mentionnée par Brumm (2004). Ce dernier a observé au cours d'un projet d'étude que les oiseaux des milieux anthropisés doivent chanter plus fort pour se faire entendre des femelles.

Or, comme le chant est l'une des dépenses les plus importantes chez les oiseaux, les mâles chantant plus fort en tentant de surpasser les bruits anthropiques possèdent souvent une plus petite taille que les mâles des milieux naturels, ces derniers étant donc avantagés au détriment des autres (Brumm, 2004). La valeur plus faible de biophonie se traduirait donc par cette baisse de biodiversité induite par la pollution sonore.

Une autre étude faite par Viellard (2000) en milieu tropical a démontré l'existence d'une relation entre l'indice d'abondance d'espèces aviaires et le degré d'anthropisation des lieux. Par ailleurs, pour la première fois l'indice de biophonie a pu être mis en relation avec le type de conservation du milieu. Le milieu le plus naturel, soit la réserve naturelle de Gaspar, est le lieu où l'anthropophonie est moindre et où la biophonie est la plus élevée. Par ailleurs, il est possible d'associer le niveau d'anthropisation aux nombres de visiteurs par année sur chacun des sites, puisqu'une très forte corrélation a été observée entre ces deux variables.

De plus, Klump (1996) affirme qu'une augmentation du bruit générée par les activités humaines en milieu urbain limite la diversification des espèces, car seules les espèces ayant les capacités d'adaptation à un bruit anthropique vont être en mesure de survivre dans un milieu fortement anthropisé (Klump, 1996). Ainsi, les espèces n'ayant pas les capacités d'adaptation requises vont périr ou tout simplement changer de milieux. Les espèces favorisées en milieu urbain sont celles dont la fréquence de chant se situe au-dessus des fréquences dominées par le trafic et les activités humaines (Slabbekoorn, 2004). Le masquage du signal par des bruits anthropiques peut ainsi compromettre gravement la communication, ce qui conduit à des difficultés dans la défense du territoire, de même que dans l'attraction des femelles envers les mâles de plus petite taille (Beecher, 1988). Encore une fois, cette hypothèse pourrait expliquer la plus faible biophonie enregistrée sur le territoire ayant la plus haute anthropophonie, qui est, en l'occurrence, le site non préservé.

Par ailleurs, le site de Rio, soit celui où l'anthropophonie maximale a été enregistrée, accueille jusqu'à 10 000 visiteurs par année et on y entend de nombreux aboiements de chiens. Le site de Gaspar ne reçoit aucun visiteur et la biophonie y est maximale. Ces résultats soulèvent un questionnement quant à l'impact des visiteurs sur la biodiversité d'un milieu. Bien entendu, un milieu qui reçoit plus de visiteurs sera davantage perturbé. Mais en calculant le rapport biophonie/anthropophonie de différents sites exposés à divers type de conservation, il devient possible d'établir des ratios témoins et ainsi d'optimiser le nombre de visiteurs par année. À titre d'exemple, nous avons calculé que le ratio biophonie/anthropophonie pour le site non protégé de RIO est de 0,02. Ce site étant gravement affecté par les bruits anthropiques (tracteurs, voitures, nombreux aboiements), nous pouvons déduire que la biodiversité d'un tel milieu est grandement affectée par la pollution sonore et que l'impact anthropique devrait y être contrôlé.

Dans le cas du site de Gaspar, qui présente un ratio biophonie/anthropophonie de 0,15, et en considérant que ce site n'est exposé à aucun visiteur et à aucun bruit fortement dérangeant, il devient possible d'évaluer un gradient de ratio biophonie/anthropophonie acceptable. Nous n'avons que trois sites à l'étude, ce qui laisse un très petit nombre d'échantillons pour établir des moyennes de ratio acceptable. Toutefois, il apparaît que nous pourrions utiliser ce ratio (biophonie/anthropophonie) comme indice de dégradation d'un milieu.

Ainsi, lorsqu'un parc national ou un autre type de milieu tente de définir un nombre optimal de visiteurs tout en préservant la biodiversité d'un milieu, il devient intéressant d'utiliser le ratio biophonie/anthropophonie. Par exemple, à partir de nos résultats, un milieu ayant un indice allant de **0 à 0,05** devrait réduire son nombre de visiteurs, un milieu ayant un ratio de **0,06 à 0,1** serait un milieu qui préserverait mais non de façon intégrale la biodiversité de son milieu, alors qu'un ratio  $\geq$  **0,11** serait un site pour lequel la préservation du milieu serait excellente. À partir de la méthodologie proposée, il serait possible d'amoindrir les risques de perte de biodiversité dans le biome de la forêt atlantique à l'aide d'un simple indice acoustique.

Encore une fois, les valeurs extrêmes de biophonie viennent affecter les résultats de régression linéaire entre la biophonie et l'anthropophonie. Pour palier à cet effet, Sueur

(2008) a effectué des analyses utilisant un croisement entre l'indice d'entropie et l'indice de dissimilitude des chants des oiseaux afin de faire une comparaison entre les forêts intactes et dégradées des basses zones côtières de la Tanzanie (Sueur, 2008). Définitivement, ces indices devraient être intégrés à l'application *Biophonie*© pour éviter les valeurs extrêmes causées par l'effet de proximité de la source sonore aussi connue sous le nom de *Near-field Error* (Sueur, 2008).

### 4.3 Variabilité spatiale de la biophonie

La majorité des relevés de biodiversité ne sont réalisés qu'une seule fois et donnent des indices qui ne laissent pas place à la dynamique qui l'affecte. À titre d'exemple, les relevés avicoles effectués par Environnement Canada vont répertorier le nombre d'espèces d'oiseaux pour une ville ou une région administrative, alors qu'en réalité, la majorité des espèces recensées pour ce territoire n'occupe qu'un écosystème, ou encore, qu'une infime portion de ce territoire, les bordures d'un lac par exemple. Les résultats obtenus dans ce projet de recherche vont dans le même sens que ceux anticipés, soit qu'il existe une variabilité *spatiale* de la biophonie.

Dans notre cas, cette variabilité a non seulement été perceptible entre les différents sites à l'étude (RIO, GAS, SPZ), mais également à travers les différents milieux (forestier, humide, écotone, ouvert) pour lesquels les relevés de biophonie ont été prélevés.

Pour ce qui est de la biophonie entre les différents sites, elle peut être attribuée au phénomène d'anthropisation soulevé précédemment. Le type de conservation du milieu et l'anthropisation (par exemple le nombre de visiteurs) ont un impact considérable sur la biodiversité d'un écosystème.

De plus, les caractéristiques physiques du milieu à l'étude ont une grande influence sur les mesures bioacoustiques. L'effet de réverbération doit être pris en compte, de même que la géophonie (bruits émis par les cours, d'eau, les feuilles d'arbres, etc.) lors de l'étude de la variabilité spatiale. Plusieurs aspects peuvent donc influencer la propagation des sons en milieu naturel. Wiley et Richards (1978) en énumèrent les plus importants, c'est-à-dire ceux qui doivent être considérés lors des études sur le terrain.

Le premier élément soulevé est l'absorption du son par le médium et par les frontières. En effet, la vitesse du son varie selon la température et la composition de l'air (humidité). Les frontières sont différents médias à travers lesquels le son est transmis. On peut donc s'attendre à ce qu'il y ait plus de chants en milieu humide qu'en milieu forestier sur un même site, puisque les ondes se propagent plus facilement près d'un cours d'eau, diminuant ainsi l'énergie émise dans le chant par l'animal. Toutefois, ce postulat n'a pu être vérifié dans ce projet de recherche car le protocole ne permettait pas des échantillonnages au même moment et dans les mêmes conditions près d'un milieu humide ou dans un milieu forestier.

Le second point est la déflexion du son par la stratification de la végétation. Les strates végétales créant des gradients de température pour lesquels la vitesse de propagation des ondes varie, les fréquences émises par les animaux peuvent varier selon le milieu dans lequel ils se retrouvent. Conséquemment, les animaux doivent adapter leur chant en fonction du type de milieu et la dépense d'énergie peut parfois être plus élevée en milieu très densément boisé.

Le troisième critère est l'atténuation du son par le sol puisqu'une importante perte d'énergie produite par le sol est enregistrée pour les fréquences situées en dessous de 2 kHz. Le dernier point soulevé par les auteurs est la dispersion des ondes par la végétation, cette dernière changeant la direction de transmission des ondes (Wiley et Richards, 1978).

Nous ne pouvons savoir lesquels des facteurs annoncés par Wiley et Richards (1978) agissent dans ces différents exemples, mais la variabilité spatiale de la biophonie ayant été démontrée, leurs effets sont probables. Notre hypothèse de départ étant confirmée, c'est-à-dire qu'il existe une différence significative entre les différents sites et entre les différents milieux. Comme prédit, le milieu de sommet est le milieu pour lequel la biophonie moyenne totale était la moins élevée, ce qui concorde avec les travaux de Dietrich (2004) qui mentionne une biodiversité moins importante en milieu de sommet pour des raisons de perte d'habitats et de nourriture en fonction de l'altitude.

Pour le milieu forestier, c'est sur le site de la réserve de Gaspar que la biophonie moyenne enregistrée est la plus élevée, alors que pour le milieu ouvert, c'est sur le site non

préservé de *Rio da Prata* que l'on a enregistré les valeurs de biophonie maximales. Ce phénomène peut s'expliquer par une adaptation des espèces aux bruits anthropiques. Brumm (2004) a fait mention de l'amplitude sonore du chant des oiseaux que certaines espèces vont s'adapter aux bruits anthropiques et ainsi modifier leur chant pour survivre en milieu fortement pollué par le son. Sur le site non préservé de RIO, les espèces se seraient possiblement adaptées aux bruits anthropiques et chanteraient malgré la forte anthropophonie, alors qu'au site de la réserve naturelle, elles préféreraient chanter en milieu forestier.

Ainsi, la bioacoustique permet de faire le suivi de la variabilité spatiale de la biodiversité. Il est donc important de prendre des mesures de son dans différents milieux afin de savoir à quel endroit la biophonie est la plus élevée et de comparer des habitats semblables entre eux. Certains écosystèmes présenteront une biodiversité plus importante dans certains milieux plutôt que d'autres pour de multiples raisons et il est important de recenser ces milieux riches en espèces (Brown, 2000). À l'aide de l'application *Biophonie*©, il est facile, rapide et efficace de prélever des échantillons sonores dans différents milieux afin de comparer ces derniers entre eux et de définir les milieux les plus riches. L'absence de biophonie dans certains milieux pourrait donc s'expliquer par un aspect d'ordre comportemental des individus (migrations, recherche de nourriture, changements induits par la température) et non une absence de biodiversité. C'est pourquoi il est important de répéter les échantillons à des périodes différentes, tant au cours d'une même journée qu'à différentes saisons de l'année.

#### **4.4 Variabilité temporelle de la biophonie**

L'étude de la variabilité temporelle de la biophonie a démontré qu'il existe une différence significative entre les différentes périodes de la journée dans les valeurs de biophonie moyennes. En effet, les périodes pour lesquelles la biophonie est maximale correspondent aux périodes prédites par la littérature (Brown 2005, Hendwood et Fabrick 1979), soit à l'aube et au crépuscule. Hendwood et Fabrick, 1979, ont d'ailleurs conclu que l'aube est le meilleur temps pour la transmission du son dans de nombreux environnements,

car ils se propagent plus rapidement, et ce, sans demander un effort supplémentaire de la part du transmetteur en raison des conditions microclimatiques propices (faible vent, humidité élevée) (Hendwood & Fabrick, 1979).

En milieu naturel, la propagation sonore se dégrade rapidement en raison des nombreuses contraintes (végétation, topographie, pluie, turbulence atmosphérique...), ce qui cause une interférence entre les ondes directes et indirectes propagées dans le médium. En chantant en des conditions microclimatiques propices, les oiseaux diminuent ces interférences (Truax, 1999). C'est sans doute pour ces mêmes raisons que l'on enregistre des moyennes de biophonie plus élevées à l'aube et au crépuscule. Les périodes pour lesquelles la biophonie s'est avérée la plus basse sont celles du matin et de l'après-midi, toutes deux correspondant à des périodes consacrées à la recherche de nourriture (Kacelnik, 1983). Ce dernier avance d'ailleurs que l'aube est une période inefficace pour repérer les proies en raison de la faible luminosité et que les oiseaux allouent leur temps à des activités différentes à des moments opportuns, car ils ne peuvent chanter et se nourrir à la fois.

Ainsi, comme l'aube présente une température faible non propice à la locomotion des insectes ou invertébrés enfouis dans le sol, de même qu'une faible luminosité pour les repérer, les oiseaux attendent le lever du soleil pour chasser. Le sol réchauffé incite donc les mouvements des proies qui seront alors plus facilement repérables par ces derniers (Kacelnik, 1983). Comme le soleil est à son zénith durant la période du midi, les chants des insectes sont plus forts en raison de la stridulation (qui est plus intense à une température plus élevée), mais ceux des oiseaux s'en voient diminués puisque ces derniers se reposent ou se nourrissent, ce qui explique que cette période n'est ni maximale, ni minimale en terme de biophonie émise (Kacelnik, 1983).

Comme mentionné par Kroodsma *et al.* (1996) et en général, l'aube est réputée pour entendre les oiseaux alors que le crépuscule est favorisé pour les batraciens (Fahrig *et al.* 1995, Sun *et al.* 2005) et pour certains insectes nocturnes (Gerhardt *et al.* 2002). Ce même phénomène a pu être observé à l'aide de l'application *Biophonie*©, puisque le site où nous avons enregistré la plus haute biophonie du groupe taxonomique des batraciens est le même

où la biophonie était maximale pour la période crépuscule<sup>2</sup> (Figure 3.4 et 3.16). Il en est de même pour les oiseaux à l'aube sur le site de la réserve naturelle de Gaspar (figure 3.5 et 3.14).

De manière générale, nous n'avons observé aucune tendance entre les différentes journées du mois de juin et juillet 2009. Comme cette période est majoritairement représentée par la saison d'hiver au Brésil, nous nous serions attendus à voir une baisse de la biodiversité en fonction des journées. Toutefois, la série temporelle n'a dénoté aucune relation entre la biophonie et la journée du mois, mais bien une relation avec le site échantillonné à chaque période. Tel que le mentionne Vielliard (2000), il existe une variabilité temporelle de la biodiversité perceptible à l'échelle saisonnière. Au Brésil, le printemps (mi-septembre à décembre) serait la saison où la biodiversité serait maximale, alors que l'hiver (mi-juin à septembre) serait la saison où elle serait à son plus bas en raison des migrations. Aucune différenciation n'a pu être enregistrée dans la série temporelle de ce travail puisqu'elle est faite à l'échelle du mois et non des saisons. Il serait toutefois intéressant de comparer deux saisons entres elles.

## **4.5 Biophonie en tant qu'indicateur de la biodiversité**

Après avoir répondu aux quatre objectifs de ce projet de recherche, qui rappelons-le, étaient de 1) démontrer une association entre la biophonie et la biodiversité en milieu tropical, 2) d'évaluer l'impact de l'anthropophonie sur la biophonie, et par conséquent de la pollution sonore sur la biodiversité, 3) d'évaluer la variabilité spatiale et 4) temporelle de la biodiversité, nous pouvons statuer sur la valeur de la bioacoustique en tant qu'indicateur de la biodiversité d'un milieu selon les sept critères mentionnés par Noss (1990).

### *4.5.1 Sensibilité de l'indicateur*

Le premier critère soulevé par Noss (1990) est la sensibilité de l'indicateur, et par conséquent, de savoir si ce dernier est assez sensible pour fournir une alerte *rapide* en cas de changement. Comme l'indice émis par l'application *Biophonie*© est un indice instantané,

c'est-à-dire qu'il est émis automatiquement une fois appliqué dans le logiciel, il est possible de voir la dynamique de la biodiversité au cours d'une même heure, voir même à l'intérieur d'une minute. Dans ses projets de recherche, Viellard (2000) a mentionné pouvoir prélever de 5 à 6 échantillons au cours de la même matinée. Comme il l'a été prouvé pour l'objectif visant à étudier la variabilité temporelle de la biodiversité, la bioacoustique permet de faire le suivi des espèces au cours d'une même journée, ce qui est amplement suffisant pour faire des études de dégradation des milieux, ou encore évaluer le potentiel d'un milieu à accueillir des visiteurs. La méthode permet donc de faire des suivis à très court, court, moyen et long terme.

#### 4.5.2 Zone géographique

Le second critère est l'applicabilité de la méthode sur une vaste zone géographique. Ce projet de recherche visait à vérifier l'applicabilité de *Biophonie*© en milieu tropical, soit dans un large bassin de biodiversité. La méthode n'a démontré aucune faille que ce soit en milieu boréal (île d'Anticosti), en milieu mixte (Isle-aux-Grues) ou tropical (Brésil). Plusieurs projets de recherche ont également été effectués aux États-Unis (*Cornell Lab of ornithology*). L'appareil étant portable, il est possible de le déposer dans tous types de milieu pour prélever des échantillons. C'est un des grands avantages que confère cette méthode, soit celui d'obtenir les résultats de manière non invasive puisque le chercheur n'a aucune interaction directe avec les espèces animales, et ce peu importe le milieu. La bioacoustique peut donc être appliquée à une échelle locale, régionale et internationale.

#### 4.5.3 Évaluation continue

Le critère suivant vise à fournir une évaluation continue de la biodiversité sur un large éventail de stress pouvant l'affecter. Je dirais que ce critère est celui qui peut être le plus remis en question puisque, comme nous l'avons observé, la méthode *Biophonie*© ne fonctionne pas durant les jours de pluie. Comme les fréquences occupées par la géophonie occupent tout le spectre des fréquences, le son de la pluie sature très rapidement les fréquences de biophonie et les échantillons deviennent ainsi inutilisables. Il en est de même

en cas de vent très fort ou lorsque le milieu est exposé à un très fort bruit de rivière. La biophonie ne permet donc pas de faire le suivi de la biophonie en cas de pluie.

De plus, comme nous l'avons mentionné précédemment, afin d'éviter les valeurs extrêmes de biophonie et de minimiser l'impact de la distance entre le capteur et la source sonore, il faudrait prendre en compte les mesures d'entropie relative des ondes et de dissimilitude entre les signaux sonores. L'exemple de Sueur (2008) qui adapte l'indice d'entropie Shannon-Weaver à ses mesures de diversité est un bon exemple et permet l'obtention d'un relevé approximatif de la population de manière instantanée.

Par ailleurs, l'application *Biophonie*© à laquelle nous ajouterions les deux indices mentionnés ci-haut pourraient fournir, sans contre-indication, une évaluation continue sur un très large éventail de stress (autres que la pluie). Il reste tout de même important de faire des relevés de météo et d'écouter chacun des enregistrements afin de s'assurer que l'énergie spectrale émise est bien celle de la biophonie et non associée à la géophonie.

#### *4.5.4 Indépendant de la taille de l'échantillon*

La bioacoustique permet d'étudier une très vaste population d'espèces animales à la fois. Si désiré, il est possible d'installer des stations d'enregistrements permanentes à de multiples endroits, et ce, simultanément. Or, il faut tenir compte que, bien qu'il soit omnidirectionnel, le microphone a une portée d'environ 30m. Il peut donc recueillir les sons qui se situent dans son rayon sonore. De plus, la bioacoustique est l'étude des sons que produisent les animaux. Certains animaux ne chantent pas et il est ainsi impossible de détecter leur présence par cette méthode. Par ailleurs, comme nous l'avons vu, les oiseaux sont un très bon indice de la santé d'un écosystème (Carignan et Viellard, 2000). Ainsi, additionnés ensemble, les chants des oiseaux, insectes et batraciens relèvent de la santé d'un écosystème et permettent de faire le suivi du milieu.

#### *4.5.5 Facilité et coût d'utilisation*

La facilité d'utilisation et le bas coût de la méthode sont deux avantages conférés à la bioacoustique. La méthode est accessible à tous puisqu'il s'agit seulement d'enregistrer les sons sur le terrain. L'expertise d'un spécialiste, bien qu'intéressante, n'est plus obligatoire pour récolter les échantillons, ce qui diminue également grandement les coûts liés à la méthode. De plus, avec la miniaturisation des appareils et la technologie qui ne cesse d'innover, le coût des appareils est très raisonnable et ces derniers sont constamment réutilisables. La possibilité de réaliser et de sauvegarder des informations à long terme, sans solliciter la présence continue de l'observateur par des stations d'enregistrement permanentes, facilite la réalisation de suivis dans tous types de milieux.

#### *4.5.6 Distinction cycles naturels ou anthropiques*

Une section complète de ce travail a été dédiée à démontrer que la méthode peut distinguer les cycles naturels des cycles anthropiques, de même qu'à les associer entre eux si nécessaire. En effet, la biophonie permet de distinguer les fréquences sonores attribuables à l'homme de celles des espèces animales. Il est donc possible de faire des études portant sur l'influence des phénomènes anthropiques sur les phénomènes naturels, de même que des comparaisons de différents milieux (selon le type de protection du territoire par exemple) entre eux. La biophonie est déjà utilisée notamment dans des études visant à caractériser les milieux par leur empreinte acoustique (Viellard, 2000).

#### *4.5.7 Phénomènes écologiques*

Le dernier critère mentionné par Noss est l'importance de l'indicateur d'être utilisable à des phénomènes écologiques. Comme son nom le dit, la bioacoustique étudie les sons produits par les animaux. Tel que mentionné dans la seconde partie du premier chapitre de ce projet, la bioacoustique est déjà largement employée dans l'étude de phénomènes écologiques. Que ce soit pour faire des études sous-marines ou découvrir de nouvelles espèces, la bioacoustique est l'une des méthodes les plus innovatrices sur le plan écologique pour faire le suivi des espèces.

## 4.6 Limites de la méthode

Pour ce qui est de la capacité de la méthode à représenter le phénomène à l'étude, elle est très représentative car elle tient compte de la *dynamique* de la biodiversité par le biais de la phénologie et de la variabilité spatiale (plusieurs habitats) et temporelle (différentes périodes de la journée). Or, elle ne tient pas compte de l'ensemble de la biodiversité animale puisque seulement les insectes, les oiseaux et les anoues sont pris en compte. Malgré ce fait, les auteurs Viellard (2002), Carignan (2002) et Gregory (2005) mentionnent que ces trois classes sont représentatives à elles seules de la biophonie reflétant ainsi la santé d'un écosystème (Carignan et Viellard, 2002 et Gregory, 2005).

Le fait de prélever des échantillons sur plusieurs sites à des dates différentes peut également affecter les résultats obtenus et c'est pour cette raison que l'on répète la prise de données sur 10 jours consécutifs au même site et que les données sont recueillies sensiblement aux mêmes heures de la journée. Or, il serait aussi intéressant, pour une étude ultérieure, d'obtenir un relevé de biodiversité traditionnel, soit un spécialiste sur le terrain faisant l'inventaire de la faune avicole et de l'herpétofaune effectué exactement au même endroit et durant la même période d'enregistrement afin de réaliser une comparaison juste et équitable.

Un travail portant sur la capacité de la méthode à distinguer biomasse et biophonie réalisé à l'université de Montréal par Catalina Bonilla démontre que, lorsqu'exposé à une forte biomasse (plusieurs individus d'une même espèce), l'application *Biophonie*© ne distingue pas nécessairement les deux variables. En effet, un signal acoustique hétérogène analysé par l'application *Biophonie*© ne se traduit pas nécessairement par un signal affichant un indice d'énergie plus élevé. C'est pour cette raison, et aussi en raison de facteurs externes tels que la distance du capteur à la source sonore que nous voudrions ajouter un indice d'entropie Shannon-Weaver aux mesures de diversité.

## 4.7 Applications de la méthode

La bioacoustique est un outil révélant la santé des écosystèmes. Ses nombreux avantages lui confèrent la possibilité d'être utilisée dans une panoplie de milieux et par une panoplie de personnes. Ainsi, ses applications sont multiples. Que ce soit pour faire le suivi d'un milieu dans le cadre d'une étude d'impact sur l'environnement, de repérer le meilleur endroit pour tracer un nouveau sentier pédestre dans un parc national, pour faire la comparaison de la biodiversité de différents milieux, pour faire état de la santé d'un écosystème, etc., cette méthode est efficace et peu coûteuse.

Des études ont d'ailleurs déjà été réalisées dans les parcs nationaux du Québec à l'été 2009 (parc national d'Anticosti, du Mont-Tremblant) afin de faire le suivi de la biodiversité dans les différents milieux. Les responsables de la conservation des parcs nationaux sont très enthousiastes à l'idée d'utiliser cette méthode sur leur territoire. Il en est de même pour les responsables des parcs nationaux du Brésil qui ont vu cette méthode être à la hauteur du plus riche bassin de biodiversité au monde. Des projets de suivis environnementaux suite à la restauration de certaines berges de l'État de Santa Catarina sont d'ailleurs prévus et la bioacoustique est l'une des méthodes proposées.

Or, comme la forêt atlantique brésilienne est l'un des biomes les plus menacés de la planète, il serait important de prioriser les études dans cette région. Déjà des suivis peuvent être initiés dans les différentes aires protégées et même sur les territoires ne relevant d'aucun type de protection que ce soit. Les propriétaires de grandes terres pourront dorénavant faire des demandes de suivis des espèces par le son sur le territoire. Actuellement, le processus pour la création de RPPN est très long en raison du manque de spécialiste capable de faire le suivi des espèces sur le terrain et des coûts élevés rattachés à ces travaux de recherche. Souvent découragés par la lenteur et les sommes faramineuses à investir, les propriétaires intéressés à transformer leurs terres en RPPN se verront décourager et laisseront le territoire sans protection. Comme nous l'avons vu, une RPPN est transformée en territoire où la coupe forestière et les pâturages sont interdits, ce qui aide à protéger les espèces. La *Mata Atlântica* est grandement menacée de disparition et il est urgent d'agir pour tenter de

protéger les zones les plus à risques. En faisant des inventaires de richesse spécifique, il devient possible de déceler les zones prioritaires à conserver.

Bien que l'image reste un média intéressant pour analyser le couvert végétal, le son peut être très intéressant dans le suivi de la biodiversité animale. Il ne reste qu'à espérer que l'Homme saura écouter l'appel à l'aide émis par l'application *Biophonie*© en milieu fortement dégradé...

## Chapitre 5. Conclusion

L'année 2010, année internationale de la biodiversité, permet de bien saisir les enjeux actuels et met en évidence le retard considérable face aux objectifs à atteindre en ce qui a trait au suivi des espèces présentes à différentes échelles dans différents biomes. Par contre, la bioacoustique vient pallier en partie à ce retard puisque les nouvelles applications que nous avons exposées permettent de faire le suivi des espèces animales sous certaines conditions et selon des critères très spécifiques.

Nos résultats ont révélé que l'application *Biophonie*© permet, comme prévu, d'associer la biophonie à la biodiversité en milieu tropical. Bien que nous n'ayons pu échantillonner que trois sites lors de ce projet d'étude, et que nos résultats ne soient pas représentatifs de l'ensemble du milieu tropical, la méthode a fait ses preuves et a démontré son efficacité. Dès lors, on peut penser l'exporter à une multitude de problématiques qui pourraient bénéficier d'un suivi de la biodiversité.

Dans un premier temps, un projet de revitalisation des berges, échelonné sur plusieurs phases, est prévu dans la ville de Blumenau au Brésil. Le projet *Piava*, initié en 2008 par le Comité de gestion du bassin hydrographique de la rivière Itajaí, vise à améliorer la qualité de l'eau des petites rivières de la Vallée de l'Itajaí par des actions éducatives, de reboisement et de réintroduction de végétation ciliaire en bordure des cours d'eau. Les responsables du projet *Piava*, de même que des chercheurs affiliés à la FURB (Université régionale de Blumenau), se sont montrés intéressés à utiliser l'application *Biophonie*© afin de faire un suivi de la biodiversité animale durant le projet. Des enregistrements seraient notamment prélevés avant et après l'introduction de la végétation ciliaire.

Un autre projet, toujours en lien avec le suivi des espèces animales, est également prévu à l'intérieur des limites du Parc national de la Serra d'Itajaí, Brésil. Une station permanente d'enregistrement, plutôt que des enregistrements ponctuels, objet du présent mémoire, serait installée dans le parc national afin de prélever quotidiennement et automatiquement des échantillons sonores. La station prélèverait donc 30 secondes de son chaque trente minutes, ce qui permettrait de faire un suivi temporel systématique et à long

terme de la biodiversité, et d'étudier les phénomènes de migration, ainsi que les effets des changements globaux.

Suite à nos travaux, des chercheurs de la FURB désirent introduire l'indicateur que nous proposons dans leurs projets de conservation. De plus, comme notre méthode permet d'obtenir un indice déterminant le nombre de visiteurs optimal pour un site, les gestionnaires de parcs nationaux pourront utiliser cet outil afin de faire connaître les ressources naturelles que le territoire peut offrir, tout en minimisant les impacts causés aux différentes espèces par une présence humaine trop intense. Par exemple, lors de la création d'un nouveau sentier pédestre, la bioacoustique peut être utilisée afin de le faire passer par des zones où la biophonie, et donc la biodiversité, est moindre, occasionnant moins d'impacts sur l'environnement.

Bien que la forêt atlantique soit l'un des biomes les plus menacés de la planète et que cette zone soit à prioriser en matière de conservation, l'application *Biophonie*© peut également être utilisée au Québec. Un projet de recherche a d'ailleurs été effectué dans ce sens au parc national d'Anticosti à l'été 2009. Le projet visait à évaluer la variabilité spatiale de la biodiversité et à comparer les relevés de biophonie avec les relevés de biodiversité prélevés sur les mêmes sites. Les responsables des parcs nationaux du Mont-Tremblant, de Plaisance, d'Anticosti et de l'Île-Bonaventure-et-du-Rocher-Percé se sont montrés très enthousiastes à l'idée d'utiliser la bioacoustique comme outil de suivi environnemental dans leur parc.

Par ailleurs, il serait intéressant de jumeler le suivi de la végétation faite par images satellites au suivi des espèces animales par la bioacoustique, car, comme nous le savons, la perte d'habitat est l'une des principales causes de l'extinction de plusieurs espèces.

Le son est de plus en plus accepté comme outil scientifique auprès des écologistes (Brown, 2000). Son emploi pour le suivi de la biodiversité n'est encore qu'effleuré, mais déjà on constate un immense potentiel. Les nombreux avantages conférés à la bioacoustique (facilité d'utilisation, ne nécessite pas la présence continue de l'observateur ou d'un spécialiste sur le terrain, peu coûteuse, obtention des données de manière non invasive, etc.) de même que les multiples applications possibles, font de cette

méthode un outil innovateur permettant le suivi des populations et communautés d'espèces. Une panoplie de projets permettant de répondre aux objectifs fixés pour le suivi des espèces sont dorénavant réalisables. Il ne manque que les chercheurs pour les mettre à exécution!

## Références

- Anjos, L. (2004) Species richness and relative abundance of birds in natural and anthropogenic fragments of Brazilian Atlantic forest. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **76**(2): 429-434.
- Associação de Preservação do Meio Ambiente e da Vida (APREMAVI). (2002) *A Mata Atlântica e Você: Como preservar, recuperar e se beneficiar da mais ameaçada floresta brasileira*, Rio do Sul, SC, 156 p.
- Bailey, W. (1991) *Acoustic behaviour of insects, an evolutionary perspective*. Chapman and Hall, Cambridge, 225 p.
- Beecher, M.D. (1988) Spectrographic analysis of animal vocalizations: implications of the «uncertainty principle». *Bioacoustics*, **1**(2-3):187-208.
- Blaustein, A.R., Kiesecker, J.M. (2002) Complexity in conservation: lessons from the global decline of amphibian populations. *Ecology Letters*, **5**: 597-608.
- Blondel J, Ferry C & Frochot B. (1970) La méthode des indices ponctuels d'abondance (I.P.A.) ou des relevés d'avifaune par "stations d'écoute". *Alauda* **38**: 55-71.
- Bockstaller C, Girardin P.(2003) How to validate environmental indicators. *Argic Syst.* **76**: 639-653.
- Bonilla, Catalina. (2010) Influence du nombre d'individus sur les mesures bioacoustiques de la biodiversité. Montréal, Université de Montréal, 35p.
- Bradbury, J.W. et Vehrencamp, S.L. (1998) *Principles of animal communication*. Department of biology, University of California, San Diego, Sinauer Associates Inc, Sunderland, 882 pages.
- Brown Jr, K. S. and A. V L. Freitas. (2000) Atlantic forest butterflies: indicators for landscape conservation. *Biotropica*, **32**:26-38.
- Brown, T.J. et Handfor, P. (2003) Why birds sing at dawn: the role of consistent song transmission. *IBIS*, **145**: 120-129.
- Brooke, P.N. et al. (2000) Environmental and social factors influence chorusing behaviour in a tropical frog: examining various temporal and spatial scales. *Behaviour Ecological Sociobiology*, **49** :79-87.

- Brumm, H. (2004) Causes and consequences of song amplitude adjustment in a territorial bird: a case study in nightingales. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **76**(2): 289-295.
- Brumm, H. (2004) The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology*, **73**: 434-440.
- Busnel, R.G. (1963) *Acoustic behaviour of animals*. Elsevier Publishing Company, Londres, 320 p.
- Carignan, V. et Villard, M-A. (2002) Selecting indicators species to monitoring ecological integrity: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, **78**: 45-61.
- Chesmore, D. (2004) Automated bioacoustics identification of species. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **76**(2): 435-440.
- Convention on Biological Diversity (CBD). (2003) Monitoring and indicators: designing national level monitoring programmes and indicators, Montreal; 2003.
- Convention on Biological Diversity (CBD) ( 2000). «2010 Biodiversity Target», [En ligne]. <http://www.cbd.int/2010-target/> (Page consultée le 3 septembre 2009).
- Cornell Lab of ornithology. (2009) «Why monitoring bird?» [En ligne]. [http://www.birds.cornell.edu/nestinginfo/extra/why\\_monitor](http://www.birds.cornell.edu/nestinginfo/extra/why_monitor) (Page consultée le 3 octobre 2009).
- Dean, W. B. (1995) *With broadax and firebrand: the destruction of the Brazilian Atlantic Forest*. University of California Press, Berkeley, California. 482. p.
- Dietrich, C., Palm, G., & al. (2004) Classification of bioacoustics time series based on the combination of global and local decisions. *The Journal of Pattern Recognition*, **37**: 2293-2305.
- Domalin, A., Louis, D., Terme, M. (2007) Travail d'étude : Le chant des oiseaux. Travail présenté dans le cadre d'une licence en biologie, Bretagne Nord, Université catholique de l'ouest, 24 p.
- Donnelly, A. Jones, M. O' Manhony, T. & Byrne, G. (2006) Selecting indicator for use in strategic environmental assessment. *Elsevier*, **27**: 161-175.
- Dunn. E. et al. (2006) «Monitoring bird populations in small geographic areas, *Special publication*». [En ligne]. <http://www.cws-scf.ec.gc.ca> (Page consultée le 2 septembre 2009)
- Eleman, C.P. (2004) How do birds sing? Sound analysis - mechanical modelling – muscular control. PhD thesis. Experimental Zoology Group, Wageningen University, The Netherlands, 281 p.
- Elridge, N. (1998) *Life in the balance : Humanity and the Biodiversity Crisis*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 219 p.

Environnement Canada. Portrait de la biodiversité du St-Laurent, Consulté le 8 octobre 2009 [http://www.qc.ec.gc.ca/faune/biodiv/fr/menu\\_recherche.html](http://www.qc.ec.gc.ca/faune/biodiv/fr/menu_recherche.html)

Ewers, R. (2005) Remotely sensed landscape heterogeneity as a rapid tool assessing local biodiversity value in a highly modified New Zealand landscape. *Biodiversity and conservation*, **14** : 1469-1485.

Fagerlund, S. (2004) *Automatic recognition of bird species by their sounds*. Helsinki University of technology, 50 p.

Farden, S., Pederson, S., Dabelsteen, T. (2003) Methods of frequency analysis of a complex mammalian vocalization. *Bioacoustics*, **13**: 247-263.

Furness, R. W . & Greenwood, J.J.D. (1993) *Birds as monitors of environmental change*. London: Chapman & Hall, 368 p.

Gage, H. S., Napoletano B., Garcia-Colonga et M., Qi, J. (2005) *An Analytical Framework to interpret Acoustic Observation in Heterogeneous Landscape*. Non publié. Michigan State University.

Gage, H. S. et Krause B.L. (2003) *Testing biophonie as an indicator of habitat fitness and dynamics*. SEKI Natural Soundscape VitalSings Pilot Program Report, non publié, États-Unis.

Gardner, T.A., Barlow, J. & al. (2009) Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecology Letters*, **12**: 561–582.

Gerhardt, H. et Huber, F. (2002) *Acoustic communication in insects and anurans, common problems and diverse solution*. The University of Chicago Press, Chicago and London, 531 p.

Grafe, T., Meuche, I. (2005) Chors and estimates of population size of male European tree frogs *Hyla arborea* : implications for conservation. *Ambhibia-reptilia*, **26**: 437-444.

Green, R. et al. (2005) A framework for improved monitoring of biodiversity : responses to the world summit on sustainable development. *Conservation Biology*, **19**(1): 56-65.

Gregory, RD. (2005) Developing indicators for Europeans birds. *The royal Society*, **360** :269-288.

Hauselberger, K., Alford, R. (2005) Effects of season and weather on calling in the australian microhylid frogs *Austrochaperina robusta* and *Cophixalus ornatu*. *Herpetologica*, **6**: 349-363.

- Hendwood, K. , Fabrick, A. (1979) A quantitative analysis of the dawn chorus: temporal selection for communicatory optimization. *Amer. Nature*. **114**: 260-274.
- Heringer H., Montenegro M. (2000) *Avaliação e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da Mata Atlântica e Campos Sulinos*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 40 p.
- Hill, P.S. (2008) *Vibrational communication in animals*. Harvard University Press, London, 257 p.
- Hilty J. et Merenlender, A. (1999) Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biological Conservation*, **92**: 185-197.
- Hobson, K.A. (2002) Acoustic surveys of birds using electronic recordings : new potential from an omnidirectional microphone system. *Wildlife society Bulletin*, **30**(3): 709-720.
- Hopp, S.L., Owren M.J., Evans, C.S. (1998) *Animal acoustic communication, sound analysis and research methods*. Édition Springer, Allemagne, 421 p.
- IBAMA, Ministério do Meio Ambiente. [En ligne] <http://www.mma.gov.br/port/sbf/dap/doc/snuc.pdf> (Page consultée le 2 septembre 2009).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) «Brasil em síntese» [En ligne] <http://www.ibge.gov.br/home/> (Page consultée le 2 septembre 2010).
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). (2000). « Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação nº 9.985, de 18 de julho de 2000.»
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO) (2009). «Legislação ambiental» [En ligne] <http://www.icmbio.gov.br/rppn/> (Page consultée le 10 septembre 2009).
- International Bioacoustic Council (IBAC). (2009) « International Bioacoustic Council» [En ligne] <http://www.ibac.info/history.html> (Page consultée le 18 janvier 2010).
- Kacelnik, A. & Krebs, J.R. (1983) The Dawn chorus and the great tit (*Parus Major*): Proximate and ultimate causes. *Behaviour*, **83**(3): 287-308.
- Katti, M. et Warren, P. S. (2004) Tits, noise and urban bioacoustics. *TRENDS in Ecology and Evolution*, **19**(3): 109-110.
- Klump, G. M. (1996) Bird Communication in the Noisy World. Ecology and Evolution Acoustic Communication in Birds. (eds Kroodsma, D.E. & Miller, E.H.) *Cornell University Press*. Chapitre **18**: 321-338.

- Kroodsma, D.E. et Miller, E. (1996) *Ecology and evolution of acoustic communication in Birds*. Cornell University Press, New-York, 468 p.
- Kroodsma, D.E. et Miller, E. (1982). *Acoustic communication in Birds : volume 1*. Academy Press, New-York, 370 p.
- Kroodsma, D.E. et Miller, E. (1982). *Acoustic communication in Birds : volume 2*. Academy Press, New-York, 388 p.
- Laporte, I. (2005) Comparaison de la biophonie de l'Isle-aux-Grues avec celle de Montréal. Montréal, présenté dans le cadre du cheminement Honor à l'Université de Montréal, non-publié, 53 p.
- Larom, D., Garstang, M. (1997) The influence of surface atmospheric conditions on the range and area reached by animal vocalizations. *The Journal of Experimental Biology*, **200**: 421-431.
- Lewis, B. (1983) *Bioacoustics: a comparative approach*. Academy Press, New York, 493 p.
- Lewinsohn, T. et Prado, P. (2005) How many species are there in Brazil? *Biotropica* **19**:619-624.
- Loh, J. et al. (2005) The living planet index : using species population time series to track trends in biodiversity. *The Royal Society*, **360** : 289-295.
- Mathevon, N. Aubin, T. (1996) Communication en milieux acoustiques extrêmes chez l'oiseau: dégradations des signaux sonores et stratégies adaptatives aux conditions défavorables de propagation. France, Université de Lyon, 133 p.
- Matlab. (2009) The MathWorks, Inc. *Guetting started guide*. Natick, USA.
- Michigan State University (2004). «*Computational Ecology and Visualisation Laboratory, Environmental Monitoring System*» [En ligne]. <http://www.cevl.msu.edu> (Page consultée le 2 septembre 2009)
- Morellato, P et Haddad, C. (2000) Introduction : The Brazilian Atlantic Forest. *Biotropica*, **32**:786-792.
- Morellato, P., Talora, D., Takahasi, A., Bencke, C., Romera, E., et Zipparro, V. (2000) Phenology of Atlantic Rain Forest Trees: a comparative study. *Biotropica*, **32**: 811-823.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). (1996) «Programa Nacional de Diversidade Biológica, Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira». MMA, Brasília» [En ligne] <http://www.mma.gov.br/port/sbf/chm/probio.html> (Page consultée le 2 septembre 2009).

Ministério do Meio Ambiente (MMA). (2002). «Biodiversidade brasileira: avaliação e identificação de áreas e ações prioritárias para conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade brasileira.» Secretaria de Biodiversidade e Florestas, MMA, Brasília.

Musée des sciences et de la technologie du Canada. (2010) « Renseignements sur le son et les technologies du son » [En ligne] <http://www.sciencetech.technomuses.ca/francais/schoolzone/basesurson.cfm#whatIs> (Page consultée le 18 janvier 2010).

Nascimento, J. (2005) Avaliação rápida das potencialidades ecológicas e econômicas do Parque Nacional de Ubajara, Ceará, usando aves como indicadores. *Ornithologia*, **1**(1): 33-42.

National Instruments. (2006) «Tutorial : An Overview of Frequency-Domain Measurements» [En ligne] <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3011#toc2> (Page consultée le 19 janvier 2010).

Nemeth, E. (2006) Rainforests as a concert halls for birds : Are reverberations improving sound transmission of long song elements? *Journal of Acoustical Society of America*. **119** (1): 620-626.

Noss, R.F. (1990) Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology*, **4**(4): 355-364.

Organisations des Nations Unies (ONU). (2002) «Sommet Johannesburg» [En ligne] <http://www.sommetjohannesburg.org/> (Page consultée le 3 octobre 2009).

Palais de la découverte. (2009) «La communication sonore» [En ligne] <http://decouverte2.in2p3.fr/index.php?id=690> (Page consultée le 18 janvier 2010).

Paris, N.B. & Alford R.A. (2000) Environmental and social factors influence chorusing behaviour in a tropical frog: examining various temporal and spatial scales. *Behav Ecol Sociobiol*, **49**:79-87.

Parris, C. M. (2002). More bang for your buck: the effect of caller position, habitat and chorus noise on the efficiency of calling in the spring peeper. *Ecological Modelling*, **156**: 213-224.

Pavan, G. (2008) Short field course on bioacoustics. Taxonomy Summer School, 1-15 septembre, 2008, centre interdisciplinaire de bioacoustique et recherche en environnement, Italie, Université di Pavia, 29 p.

PNUE. (2007). *Avenir de l'environnement mondial : l'environnement au service du développement (GEO 4)*. UNEP, 540 p.

Raven software, the Raven 1.4 User's Manual , and example sounds Copyright ©2003-2008 Cornell Lab of Ornithology. All rights reserved.

- Quinquis, André. (2000) *Le traitement du signal sous Matla*. Collection traitement du signal. 380 p.
- RBMA (Reserva da Biosfera da Mata Atlântica). 2009. «A Mata Atlântica» [En ligne] [http://www.rbma.org.br/anuario/mata\\_01\\_sintese.asp](http://www.rbma.org.br/anuario/mata_01_sintese.asp) (Page consultée le 2 septembre 2009).
- Reijen, R., Froppen, R. & Veenbaas, G. (1997) Disturbance by traffic of breeding birds: evaluation of the effect and considerations in planning and managing road corridors. *Biodiversity and Conservation*, **6**: 567-581.
- Riede K. (1993) Monitoring biodiversity: analysis of Amazonian rainforest sounds. *Ambio*, **22**(8): 546-548.
- Riede, K . (1998) Acoustic monitoring of Orthoptera and its potential for conservation. *Journal of insect conservation*, **2**: 217-223.
- Royal Society. (2003) *Mesuring biodiversity for conservation*. Policy document. London: The Royal Society, 228 p.
- Schacht, K. et Dallacorte, F. (2006) «Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra do Itajai.» ACAPRENA [En ligne] <http://www.acaprena.org.br> (Page consultée le 2 septembre 2009).
- Schäffer W. B., Prochnow M. (2002). Mata Atlântica. In: Schäffer W. B., Prochnow M. (Eds.). *A Mata Atlântica e Você. Associação de Preservação do Meio Ambiente do Alto Vale do Itajaí*, Brasília: 12-44.
- Scherrer, B. (2007) *Biostatistique Volume 1*. Montréal, Gaëtan Morin éditeur, 816 p.
- Scherrer, B. (2007) *Biostatistique Volume 2*. Montréal, Gaëtan Morin éditeur, 576 p.
- Schmitt, C.B. et al. (2008) *Global Ecological Forest Classification and Forest Protected Area Gap Analysis*. Analyses and recommendations in view of the 10% target for forest protection under the Convention on Biological Diversity (CBD). In. University of Freiburg, Freiburg.
- Smith, S.W. (2007) «The scientist and engineer's guide to digital signal processing» [En ligne] <http://www.dspsguide.com/pdfbook.htm> (Page consultée le 19 janvier).
- Slabbekoorn, H., Peet, M. (2003) Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature*, **424** : 267-267.
- Sokal, Robert & Rohlf, James. (1995) *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. New York, W.H. Freeman and Company, 887 p.
- SOS Mata Atlântica (2004) «Mata Atlântica» [En ligne] <http://www.sosmatatlantica.org.br/> (Page consultée le 2 septembre 2009).

Staicer, C.A., Spector, D.A. & Horn, A.G. (1996) The dawn chorus and other diel patterns in acoustic signalling. In Kroodsma, D.E. & Miller, E.H. (eds) *Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds*: 426-453. Ithaca, NY: Cornell University Press.

Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., Duvail, S. (2008) Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PloS ONE*, **3**(12): e4065.

Sun, Jennifer & Narins, P.M. (2005) Anthropogenic sounds differentially affect amphibian call rate. *Biological Conservation*, **121**: 419-427.

The World Conservation Union. (2007) IUCN Red List of Threatened Species. Summary Statistics for Globally Threatened Species. Table 1: Numbers of threatened species by major groups of organisms (1996–2007).

Telfer, E.S. et Farr, D.R. (1993) The potential of acoustical recordings as a means of monitoring breedings birds. *Canadian Wildlife Service*, **203**: 213-223.

Timothy, J. B. & Handford, P. ( 2003) Why birds sing at dawn: the role of consistent song transmission. *Ibis*, **145**: 120-129.

UNESCO. United nations educational scientific and cultural organization (2010) «Biodiversité de la forêt atlantique brésilienne » [En ligne] [http://whc.unesco.org/archive/advisory\\_body\\_evaluation/893-894.pdf](http://whc.unesco.org/archive/advisory_body_evaluation/893-894.pdf) (Page consultée le 3 avril 2010).

Union Internationale de Conservation de la Nature (UICN). (1994) «Lignes directrices pour les catégories de gestion des aires protégées. » *Commission des parcs nationaux et des aires protégées de l'Union mondiale pour la nature avec l'assistance du Centre mondial de la surveillance continue de la conservation*, 102 p.

United Nations Development Programme (UNDP). (2008) «Biodiversity targets» [En ligne] <http://www.undp.org/biodiversity/biodiversitycd/bioImport.htm> (Page consultée le 3 octobre 2009).

United Nations Environment Programme (UNEP). (2007) «GEO4 : l'environnement pour le Développement» [En ligne] [http://www.unep.org/geo/geo4/report/GEO-4\\_Report\\_Full\\_FR.pdf](http://www.unep.org/geo/geo4/report/GEO-4_Report_Full_FR.pdf) (Page consultée le 3 octobre 2009).

Université Laval (ULaval). (2010) «Ile d'Anticosti» [En ligne] <http://www.cen.ulaval.ca/anticosti/> (Page consultée le 23 avril 2010).

Vielliard, J. (2004) Advances in bioacoustics. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **76**(2): I-IV.

- Vielliard, J. (2000) Bird community as an indicator of biodiversity : results from quantitative surveys in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **72**(3): 323-330.
- Vielliard J & Silva WR. (1990) Nova metodologia de levantamento quantitativo e primeiros resultados no interior do estado de São Paulo. *Anais ENAV, UFRPe*, Recife, **4**: 117-151.
- Waxler, Roger. (2003) Modal expansions for sound propagation in the nocturnal boundary layer. *J. Acoustical Society of America*, **115**(4):1437-1448.
- Wiley, R. H., and Richards, D. G. (1978). "Physical constraints on acoustic communication in atmosphere—Implications for evolution of animal vocalizations," *Behav. Ecol. Sociobiol.* 3, 69–94.
- Wong, B.B., Cowling, A.N.N., Cunningham, R.B., Donnelly, C.F. et Cooper, P.D. (2004) Do temperature and social environment interact to affect call rate in frog (*Crinia signifera*). *Austral Ecology*, **29**: 209-214.
- WWF (World Wildlife Fund). (2009) «WWF Brasil» [En ligne]. <http://www.wwf.org.br/> (Page consultée le 2 septembre 2009).

## Application *Biophonie*©

```

function [listeFichier,Tabl]=biophonie_memoire
%ListeFichier est la cellaray des noms de fichiers, Tabl est la matrice
contenant
%tous les résultats qui est retourné

%*****
%CONFIGURATION
%*****
%repertoire = 'C:\Documents and Settings\Isabelle Laporte\My
Documents\.....'; % Indiquer la bonne adresse du
répertoire
repertoire = 'C:\Users\Paul Comtois\Desktop\Biophonie\Nofilter\SPZ-4-
30sec';
image = 1; %Choix si on veut afficher ou non le spectre de puissance 0 =
non, 1 = oui
%*****

%Récupération de la liste de fichier .wav
liste = dir(fullfile(repertoire,'*.wav')); %on récupere la liste des .wav
du répertoire dans une structure

listeFichier = cell(length(liste),1); %Liste de cellule VIDE qui va
contenir les noms (texte) des fichiers
Tabl=zeros(length(liste),7);%la matrice VIDE qui va enregistrer TOUS les
résultats numérique

for i=1:length(liste) %pour chaque élément de la matrice
    fichierLu=liste(i).name; %pour avoir le NOM du fichier .wav courant,
qui est dans la 'structure liste'.
    listeFichier(i,1) = cellstr(fichierLu); %on enregistre uniquement le
nom de tous les fichiers. MEME ordre que les résultats
    titreImage = fichierLu; %on conserve le nom du fichier, pour mettre
en titre
    fichierLu = fullfile(repertoire,fichierLu); %On reconstruit le chemin
d'acces + nom des fichiers, pour pouvoir lire dans un autre répertoire

    % Calcul de 'Average power' selon une bande de fréquence données à
l'aide
    % de la méthode de Welch.

    [signal,Fs]=wavread(fichierLu); % Lecture du signal
    Pxx = pwelch(signal, [], [], 512, 22050); % Calcul du pwelch
    Hpsd = dspdata.psd(Pxx, 'Fs', 22050, 'spectrumType', 'onesided');

    % [Pxx,w]=pwelch(x) estimates the power spectral density PXX of the
input signal vector X using Welch's method. Welch's method splits
the data into overlapping segments, computes modified periodograms

```

of the overlapping segments, and averages the resulting periodograms to produce the power spectral density estimate.

```

%Création de l'objet

if (image == 1)
    figure(i)
    plot(Hpsd) % Graphique de l'objet
    set(gca,'fontsize',8)
    set(get(gca,'Xlabel'),'String','Fréquence (kHz)','fontsize',9)
    set(get(gca,'Ylabel'),'String','amplitude/fréquence
(dB/Hz)','fontsize',9)
    titreImage = [titreImage,' Spectre de puissance']; %on rajoute
au nom du fichier l'info du graph
    title(titreImage,'fontsize',12) %on affiche le titre complet
end

    Tabl(i,2) = avgpower(Hpsd,[4000 5000]); %Calcul de l'average power
pour la biophonie-InsecteA
    Tabl(i,3) = avgpower(Hpsd,[8000 11025]); %Calcul de l'average power
pour la biophonie-InsecteB
    Tabl(i,4) = avgpower(Hpsd,[3000 4000]); % Calcul de l'average power
pour la biophonie-OiseauA
    Tabl(i,5) = avgpower(Hpsd,[5000 8000]); % Calcul de l'average power
pour la biophonie-OiseauB
    Tabl(i,6) = avgpower(Hpsd,[2500 3000]);% Calcul de l'average power
pour la biophonie-batracien
    Tabl(i,7) = avgpower(Hpsd); %Calcul de l'average power du signal
entier
    %*****
    %Ne pas oublier le chiffre en haut!!!
    %*****

end

%On sauvegarde toutes les données
%save stats.txt Tabl -ascii
dlmwrite('stats.csv',Tabl,',') %on sauvegarde au format 'excel'
%save statsNom.txt Tab2 -ascii

```