



Le projet EIEFAG :

Evaluer les impacts de l'exploitation forestière sur l'avifaune de Guyane – Mise en place d'un protocole de suivi.



© Ugo Coste/ONF

Olivier CLAESSENS

GEPOG
431 route d'Attila Cabassou
97 354 Rémire-Montjoly

Thierry CHAMBERT

CEFE – CNRS
1919 route de Mende
34 090 Montpellier

Sommaire

Remerciements	3
Résumé	5
I. INTRODUCTION	7
I. 1. Contexte	7
I. 2. Objectifs	8
II. SITES D'ETUDE	8
II. 1. Localisation.....	8
II. 2. Habitats	11
II. 3. Perturbations d'origine anthropique	11
II. 4. Parcours et points d'observation	12
II. 5. L'avifaune des sites d'étude.....	14
III. METHODES	15
III. 1. Relevés de terrain	15
III. 2. Plan d'échantillonnage et calendrier des relevés de terrain	16
III. 3. Méthodes d'analyses	17
III. 3. 1. Analyses des peuplements.....	17
III. 3. 2. Tests de puissance : calibration de l'effort requis	18
Identification des espèces cibles.....	18
Définition du type d'impact	20
Définition quantitative de la force d'effet attendu	21
Stratégies et intensités de suivis évaluées.....	21
Tests de puissances	24
Simulations.....	25
Espèces colonisatrices.....	27
III. 4. Personnel impliqué dans l'étude	28
III. 5. Archivage des données	28

IV.	RESULTATS	29
IV. 1.	Bilan général.....	29
IV. 2.	Structure des peuplements d’oiseaux : diversité et composition d’espèces	30
IV. 3.	Calibration de l’effort requis	31
IV. 4.	Relation Effort-Puissance	33
IV. 5.	Espèces colonisatrices.....	35
IV. 6.	Bilan des tests de puissance.....	38
V.	CONCLUSIONS	39
V. 1.	Succès et perspectives du projet EIEFAG	39
V. 2.	Effets indirects de l’exploitation forestière	40
V. 3.	Répliquabilité et transposition des résultats à d’autres sites ou modes de gestion ..	40
V. 4.	Contributions aux besoins et priorités du territoire	41
	Bibliographie	42
	ANNEXES.....	45

Citation :

Claessens, O. & Chambert, T. (2019). *Le projet EIEFAG : Evaluer les impacts de l’exploitation forestière sur l’avifaune de Guyane – Mise en place d’un protocole de suivi*. GEPOG / CEFE. Rapport non publié, 58 p.

Remerciements

Nous remercions l'ONF et plus particulièrement Olivier Bruneau, Ugo Coste et Sébastien Dufour pour leur contribution à la réalisation des missions de terrain, de même que les accompagnateurs, bénévoles pour la plupart, qui ont participé aux missions et qui par leur motivation et leur bonne humeur ont permis qu'elles se déroulent avec succès malgré les difficultés du terrain : Tanguy Deville, Eliot Duffroy (GEPOG), Sébastien Dufour (ONF), Stefan Icho (GEPOG), Roland Jantot, Florence Lierman, Benjamin Luneau (GEPOG), Quentin d'Orchymont (GEPOG), Sylvie Payeur, Thomas Requillart, Pierre Silland, Anthony Stoquert, Maxime Thomas. Ugo Coste (ONF) nous a apporté de nombreuses informations utiles sur les habitats et les pratiques forestières sur nos sites d'étude. Ugo Coste, Roland Jantot, Sylvain Uriot ont fourni la plupart des photos qui illustrent ce rapport. Nous remercions également Aurélien Besnard (CEFE) pour son appui méthodologique à différentes étapes de cette étude.

Ce travail a bénéficié d'un financement de la Commission Européenne (DG ENV) dans le cadre du programme BEST RUP « *Promouvoir la conservation et l'utilisation durable de la Biodiversité et des Services Ecosystémiques dans les Régions Ultra-Périphériques françaises* », mis en œuvre par l'UICN (contrat de subvention BEST RUP n° 2487).



© U. Coste/ONF

La piste « Armontabo » au niveau d'un couloir écologique.

Résumé

Contexte et objectifs : La forêt guyanaise est un hotspot de biodiversité de plus en plus menacé par les perturbations anthropiques résultant de la croissance démographique forte du pays. Il devient urgent d'étudier et de comprendre les impacts de ces perturbations sur l'avifaune forestière, qui est indicatrice de la santé globale de l'environnement local. Pour évaluer ces effets de façon fiable, il est nécessaire de disposer d'une méthodologie de suivi des espèces adaptée d'une part aux contraintes de terrain (milieu forestier guyanais) et d'autre part aux objectifs visés, en termes de précision des résultats attendus. Le projet EIEFAG a pour but de combler les lacunes des dispositifs de suivi existants en définissant un protocole qui permettra d'évaluer les impacts de l'exploitation forestière à l'échelle d'un site particulier.

Méthode : Une étude pilote de suivi des communautés d'oiseaux a été menée en 2018-2019 selon un plan d'échantillonnage intensif, sur deux sites comparatifs dans le massif forestier de Régina-Saint-Georges : un site désigné pour l'exploitation, laquelle a débuté en 2018, et un site témoin non exploité. Les relevés d'avifaune ont été effectués selon la technique des échantillonnages ponctuels simples (points d'écoute de 5 minutes) utilisés pour le Suivi des oiseaux communs (STOC-EPS). Des tests de puissance statistique ont ensuite été réalisés afin de définir l'effort de suivi qui sera requis, dans les années à venir, pour mettre en évidence les effets possibles de l'exploitation forestière. Quatre critères d'évaluation, correspondant aux effets plausibles de l'exploitation, ont été testés : (i) une diminution prononcée des espèces les plus sensibles, (ii) une diminution prononcée des mêmes espèces et une diminution modérée d'espèces moins sensibles, (iii) une augmentation de certaines espèces généralistes, et (iv) une colonisation par des espèces non forestières initialement absentes. Ces quatre critères ont été testés selon différents scénarios de force des effets attendus et selon différents niveaux d'intensité de suivi, afin de comparer la précision et la fiabilité des résultats attendus.

Résultats : Le suivi pilote de 2018-2019 (480 relevés réalisés au total), a permis de détecter 197 espèces, dont 169 sur le site exploité et 164 espèces le site témoin, soit respectivement 72 % et 65 % des peuplements. Aucune différence nette de diversité ou de composition d'espèces n'a pu être mise en évidence entre les deux sites à ce stade de l'exploitation qui n'a débuté que très récemment. Les analyses de puissance ont permis de calibrer précisément l'effort de suivi requis pour détecter différents niveaux d'impact de l'exploitation forestière selon le degré de certitude souhaité.

Les résultats révèlent qu'une stratégie efficace consisterait à focaliser les analyses (1) sur les espèces susceptible de subir une baisse d'abondance et (2) sur les espèces colonisatrices. En se basant sur un seuil de certitude de 80 % et une force d'effet (intensité de la baisse) intermédiaire, le protocole optimal consisterait à réaliser 30 points d'écoute par site, avec 8 et 10 réplicats temporels sur chaque point. Cet effort pouvant être réparti sur 1 à 3 ans, ce plan d'échantillonnage semble tout à fait réalisable avec les moyens disponibles. Si des contraintes logistiques ou budgétaires nous forçaient à réduire l'intensité de suivi, le

nombre de répliqués spatiaux réalisés pourrait être diminué jusqu'à 10 points d'écoute, tout en gardant une grande capacité à détecter des effets forts de l'exploitation (degré de certitude proche de 80 %). En revanche, il serait plus difficile de détecter des effets de force intermédiaire, chose qu'il faudra considérer dans le choix final du plan d'échantillonnage et de l'effort alloué au suivi.

Conclusions : L'analyse des données a fourni des éléments importants pour orienter les choix du suivi à mener dans le futur. Les tests de puissance statistique ont permis de fournir des recommandations précises quant à l'effort à déployer pour un suivi apte à mettre en évidence un effet de l'exploitation forestière sur l'avifaune. Le choix final du protocole résultera d'un compromis entre les objectifs visés, en termes de fiabilité et de précision des résultats, et les moyens (budgétaires et en temps) que l'on pourra mettre en œuvre sur le site en question. Nous discutons également de façon plus générale des effets potentiels de l'exploitation forestière sur l'avifaune, de la répliquabilité de nos résultats dans des cas d'études similaires, ainsi que de la contribution de nos travaux aux besoins et priorités du territoire guyanais.



Troglodyte arada (Cyphorhinus arada).

I. INTRODUCTION

I. 1. Contexte

La forêt guyanaise héberge près de 400 espèces d'oiseaux, soit plus de la moitié de l'avifaune connue en Guyane (CHG 2019). Si une faible proportion d'entre elles est aujourd'hui menacée (MNHN *et al.* 2018), elle le doit au bon état de conservation général du massif forestier. La Guyane, département français et région ultra-périphérique de l'Union Européenne, possède en effet l'un des blocs forestiers les mieux préservés d'Amérique du Sud, en continuité avec la vaste forêt amazonienne (Turner & Corlett 1996). La population humaine est essentiellement concentrée sur une étroite bande côtière adossée au bloc forestier. Faisant face à une croissance démographique très forte, cette partie de la Guyane vit cependant actuellement une période de rapide mutation : défrichements agricoles, exploitation forestière, urbanisation, développement des énergies renouvelables au détriment des espaces naturels. Il devient urgent d'étudier les effets de ces changements sur l'avifaune, indicatrice de l'état de santé global de l'environnement. Dans le cadre des travaux présentés ici, on souhaite plus précisément pouvoir étudier l'impact de l'exploitation forestière sur l'avifaune des parcelles exploitées.

Les effets de l'exploitation forestière sur l'avifaune ont fait l'objet de nombreuses études à travers le monde, notamment dans les régions tropicales (Gray *et al.* 2007). En Guyane, Thiollay (1992, 1997) s'est intéressé à cette question ; ses observations et conclusions rejoignent celles des études menées dans d'autres pays d'Amérique du Sud.

La recherche d'indicateurs permettant d'évaluer l'impact des activités humaines et des changements globaux sur la biodiversité est une priorité de l'Union Européenne en matière d'environnement. L'un des outils existant en France métropolitaine est le Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC-EPS ; Julliard & Jiguet 2002), reconnu comme un indicateur structurel de l'Union Européenne pour le développement durable (Dormoy 2003). Le Suivi des oiseaux communs a été mis en place en Guyane en 2012, sous une forme adaptée au contexte régional (Claessens *et al.* 2015). A l'image des indicateurs développés en France métropolitaine (Jiguet *et al.* 2011), il vise à mesurer les variations d'abondance des oiseaux communs à l'échelle de la Guyane. Cependant, son développement est lent et les données ne permettront pas d'affiner l'échelle d'analyse (par sous-régions ou types d'habitats) avant de nombreuses années (Claessens & Ricardou 2017). Nous ne disposons à ce jour d'aucun outil permettant d'étudier les tendances des oiseaux de Guyane à l'échelle d'un site exploité.

I. 2. Objectifs

Le projet EIEFAG vise à combler cette lacune en déterminant l'effort d'échantillonnage nécessaire pour obtenir les données permettant de détecter des variations d'occurrence des espèces à l'échelle d'un site. Les questions auxquelles il doit répondre sont les suivantes :

- Combien de relevés faut-il effectuer ?
- Comment faut-il les répartir dans l'espace (combien de points de comptage faut-il définir) ?
- Comment faut-il les répartir dans le temps (combien de réplicats temporels faut-il réaliser) ?
- Compte tenu de l'effort déployé, quelle est la probabilité de détecter une variation d'abondance des espèces ?

In fine, la mise en œuvre du protocole défini par ce travail permettra d'étudier les effets de l'exploitation forestière sur l'avifaune, et devrait par conséquent aider à définir un niveau d'exploitation compatible avec le maintien des communautés d'oiseaux.

Le travail réalisé ici est novateur pour le suivi des communautés d'oiseaux en Guyane. Nous attendons également du protocole issu de ce travail qu'il soit facilement transposable à d'autres sites forestiers ou éventuellement à d'autres types de gestion des milieux naturels, telles que l'agriculture ou la gestion de sites protégés.

II. SITES D'ETUDE

II. 1. Localisation

Le projet s'est déroulé conjointement sur deux sites distincts, l'un en cours d'exploitation forestière, l'autre servant de site témoin exempt de perturbation. Les deux sites se trouvent au sein de la Zone Spéciale de Conservation (ZSC) de la Forêt aménagée de Régina-Saint-Georges, à environ 12 km à l'ouest du bourg de Saint-Georges, dans le nord-est de la Guyane. Les deux sites sont distants l'un de l'autre de 4,5 km (**figure 1**).

Le site exploité (51°54' W / 03°51' N, altitude 90 m) est constitué principalement des parcelles ONF n°763 et 764, plus marginalement des parcelles n°759 et 766 du secteur Maweyo. Ce secteur borde la piste ONF « Armontabo », une piste latérale du côté ouest de la piste de Saut Maripa, globalement orientée est – ouest et destinée à desservir toute la future zone exploitée. Cette portion de la piste « Armontabo » a été ouverte en 2015 et

l'exploitation des parcelles concernées a débuté en 2017 sur la parcelle 759, fin 2018 sur la parcelle 764 ; elle n'a pas encore commencé sur les deux dernières parcelles de notre site.

Le site témoin (51°55' W, 03°55' N, altitude 35 m) est constitué de la parcelle n°248 du secteur Gabaret, située sur la rive droite (sud) de la crique Gabaret près du Saut Mérignan au nord du site exploité. Il a été choisi en raison de sa relative proximité et de son accessibilité par voie fluviale, de sa similitude de relief et d'habitats avec le site exploité, et de son classement en « Protection physique générale des milieux ». C'est une série de protection qui le met à l'écart de toute exploitation future.

La superficie de chacun des deux sites est d'environ 500 ha.

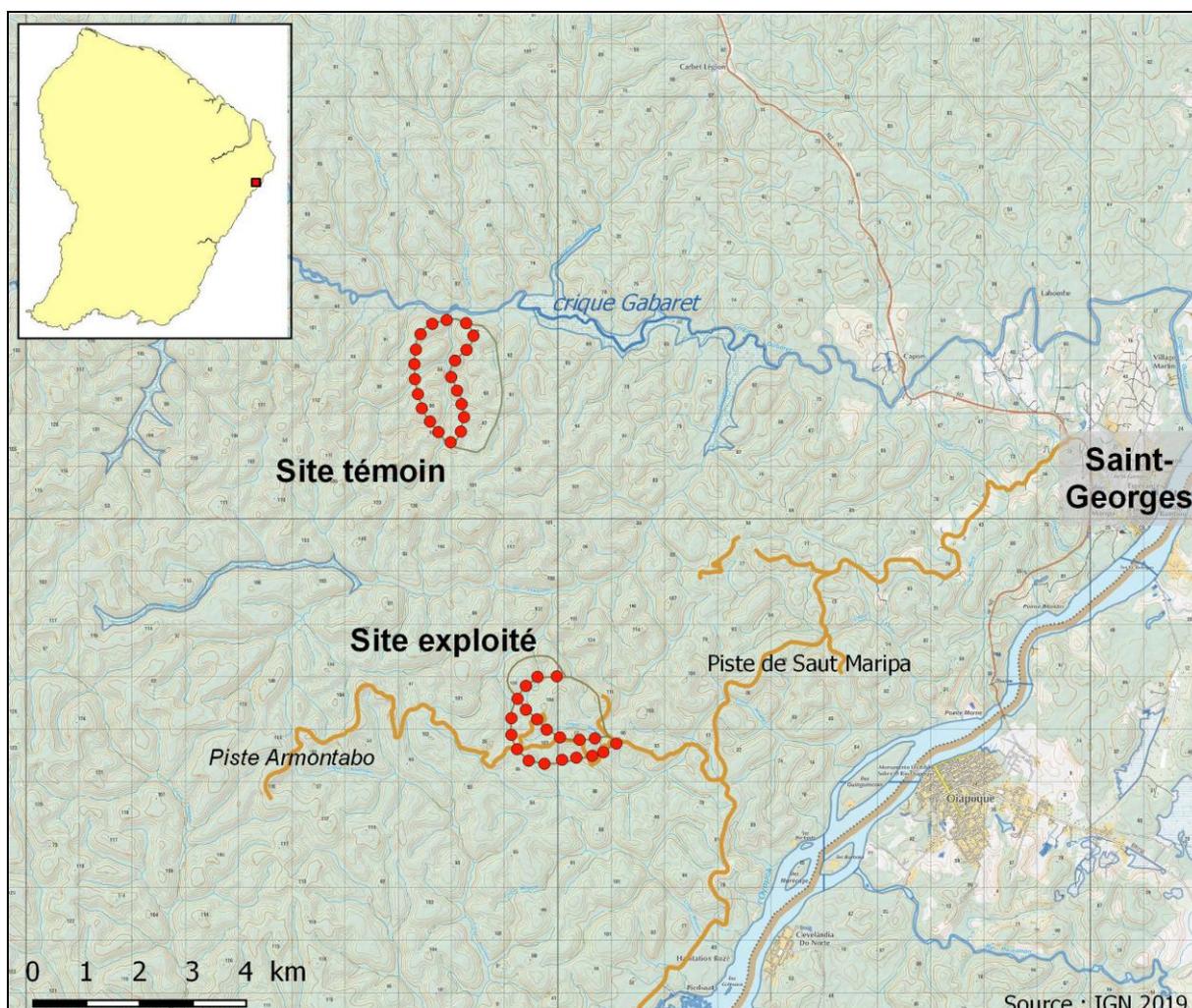


Figure 1 : Localisation des sites d'étude. Chaque point rouge correspond à un point de relevé.



© O. Claessens

Bas-fond à palmiers toulouris



© U. Coste/ONF

(ci-dessus) Piste secondaire sur le site exploité

(ci-contre) Aire de stockage



© U. Coste/ONF

II. 2. Habitats

La zone d'étude dans son ensemble est constituée d'une forêt primaire de terre ferme, avec une alternance de crêtes et de bas-fonds à palmiers toulouris (*Manicaria saccifera*) parcourus de petites criques et criquots (ruisseaux). Les habitats sont globalement très semblables sur les deux sites, avec une canopée haute et un sous-bois riche en palmiers (*Astrocaryum sp.*), en particulier sur le site exploité. Selon le Catalogue des habitats forestiers de Guyane (Guitet *et al.* 2015), le secteur Maweyo se situe dans l'aire des « forêts des plateaux élevés à angélique, moni et bita tiki », une sous-catégorie des « forêts de plateaux à *Caesalpinioideae* et *Burseraceae* ». Ces forêts sont caractérisées par l'abondance du bita tiki (*Diospyros spp.*, Ebenaceae).

Les points de relevés reflètent cette alternance de bas-fonds et de crêtes sur les deux sites. Ils se répartissent à peu près de la même manière entre ces deux types d'habitats sur les deux sites : 4 points sur les 20 du site exploité sont dans des bas-fonds, et 6 points sur 20 pour le site témoin. Ces bas-fonds larges de quelques dizaines de mètres tout au plus le long des ruisseaux sont occupés par un peuplement quasi monospécifique de palmiers toulouris. Sachant que les bas-fonds étaient souvent plus pauvres (sur nos sites d'étude) que les zones de pente ou de colline, cette petite différence entre le site exploité et le site témoin a pu se ressentir sur le nombre total d'oiseaux détectés, mais pas sur la composition des peuplements.

II. 3. Perturbations d'origine anthropique

L'exploitation forestière a engendré plusieurs types de modification des habitats qui sont apparues progressivement, avant et pendant le déroulement du projet EIEFAG. Deux pistes secondaires dites de « fin de réseau » ont été ouvertes (2018) ainsi que des pistes de débardage ou cloisonnements régulièrement espacés tous les 50 à 100 m environ (2018-2019). La piste principale (« piste Armontabo ») et les deux pistes secondaires sont larges d'environ 20 m et 10 m respectivement, auxquels s'ajoute une bande de sécurité au moins égale de part et d'autre. Parallèlement, trois aires de stockage des grumes ont été dégagées le long de la piste principale, augmentant localement la largeur de terrain déboisé. Ces ouvertures de pistes et d'aires de stockage représentent une superficie totale d'environ 32 ha, soit 7 % de la surface du site d'étude. Outre la réduction de surface d'habitat pour des espèces forestières, la perte de sites de nidification (Aleixo 1999) ou de parade (Endler & Théry 1996), et la perte de ressources, ces ouvertures linéaires sont également susceptibles de perturber le comportement des animaux en entravant notamment leurs déplacements. Certains oiseaux du sous-bois de la forêt amazonienne ou guyanaise sont en effet très sensibles à l'ouverture et à la fragmentation du couvert forestier, évitant les lisières et répugnant à traverser un espace ouvert de quelques dizaines de mètres (Stouffer & Bierregaard 1995, Claessens 2000). A l'inverse, certaines espèces colonisatrices peuvent suivre ces ouvertures linéaires pour pénétrer dans le bloc forestier et coloniser de nouveaux sites.

L'exploitation elle-même se limite aux plateaux et aux zones de pente inférieure à 30 %, localement 35 %, correspondant à environ la moitié de la surface cadastrale. Elle a débuté sur le site d'étude en 2017 (parcelle 759) ou 2018 et 2019 (parcelles 760, 762). Elle doit s'étendre à partir de 2020 aux parcelles voisines, exceptées celles classés en protection. L'exploitation consiste en une coupe sélective d'arbres destinés au bois d'œuvre, avec un objectif d'exploitation de 5 ou 6 tiges/ha conformément à la charte d'« exploitation à faible impact » de l'ONF ; les principales essences exploitées sur le site d'étude sont l'Angélique (*Dicorynia guianensis*, Caesalpiniaceae), le Balata Franc (*Manilkara bidentata*, Sapotaceae) et le Grignon Franc (*Ocotea rubra*, Lauraceae). Il s'agit d'arbres de grande taille dépassant 40 m de haut. Les arbres de moindre valeur, abattus pour la création des pistes, pour accéder aux arbres ciblés ou détériorés accidentellement, seront également extraits à partir de 2020 en vue d'alimenter une centrale à biomasse. A la date de l'étude, le nombre de tiges/ha est cependant plus faible car l'exploitant refuse certains bois qui se révèlent creux après sondage et le bois énergie n'est pas encore pris en compte dans l'exploitation.

Il est admis que les abords de la piste de Saut Maripa souffrent d'une pression de chasse excessive qui a sensiblement appauvri la faune locale (ONF 2007, confirmé par une source locale). Bien que la piste « Armontabo » soit fermée par une barrière, limitant l'accès aux exploitants et personnes autorisées, le site exploité reste facile d'accès pour les chasseurs, et ce depuis 2014, année où la piste « Armontabo » a atteint le site. La pression de chasse y était probablement en diminution (provisoirement) pendant l'année d'étude en raison d'une surveillance accrue durant la phase d'exploitation. Le site témoin quant à lui n'est accessible qu'en pirogue, mais à seulement 2 ou 3 heures de navigation depuis le bourg de Saint-Georges ; le saut Mérignan, juste en aval du site, n'est pas un obstacle sérieux. La pression de chasse sur le site témoin est donc au moins constante, voire en augmentation depuis la création des layons pour les besoins de l'étude, layons qui sont mis à profit par les chasseurs. La chasse pratiquée en forêt guyanaise vise surtout le gros gibier : tapir, pécaris, daguets (« biches »), et pour les oiseaux Hocco (*Crax alector*), Grand Tinamou (*Tinamus major*), Pénélope marail (*Penelope marail*), toucans et perroquets (source ONCFS). Cette chasse épargne *a priori* la plupart des espèces d'oiseaux communs pris en compte dans le STOC-EPS comme dans le projet EIEFAG ; toutefois Thiollay (1986) a montré que la chasse même orientée sur les grosses espèces gibier peut impacter indirectement l'ensemble du peuplement d'oiseaux.

II. 4. Parcours et points d'observation

Les deux sites sont suivis depuis décembre 2014 dans le cadre du Suivi des oiseaux communs (STOC-EPS). La mise en place du programme STOC-EPS sur ces sites répondait à une demande de l'ONF en vue d'étudier les effets de la future exploitation forestière sur l'avifaune (projet FEDER / ADEME "Bois Energie" ; Claessens 2015). Pour les besoins de ce travail, trois layons de 3 km de long ont été ouverts par l'ONF sur chacun des sites, alors encore vierges. Pour des raisons pratiques, ces layons forment des boucles, ce qui à l'usage s'est avéré contre-productif et contraignant.

Les points de relevés d'avifaune sont répartis sur ces parcours, à raison de 10 points par parcours, distants de 250 à 300 m les uns des autres (**figure 2**). Définis sur carte de façon théorique sans tenir compte du terrain, ces points sont représentatifs de la diversité des différents micro-habitats traversés par les layons.

Le projet EIEFAG a repris ces mêmes points de relevés. Afin de concilier le rythme plus élevé des missions et l'effort plus intense (voir Méthodes) comparé au STOC-EPS, seulement 2 parcours sur chaque site ont été conservés pour le projet EIEFAG (parcours STG-01 et STG-02 sur le site exploité, parcours STG-04 et STG-05 sur le site témoin), ce qui représente donc 20 points de relevés sur chacun des sites. Les deux autres parcours ont été abandonnés.

Les layons, qui n'avaient reçu qu'un entretien superficiel depuis leur création en 2014, ont été entièrement refaits au début du projet EIEFAG (juin 2017), préalablement au commencement des relevés. Ce travail préliminaire indispensable a grandement facilité la réalisation ultérieure des relevés d'avifaune, en évitant à l'opérateur de se perdre et en permettant le déplacement rapide entre deux points de relevés, condition nécessaire au respect du protocole (cf. chap. III. 1.).

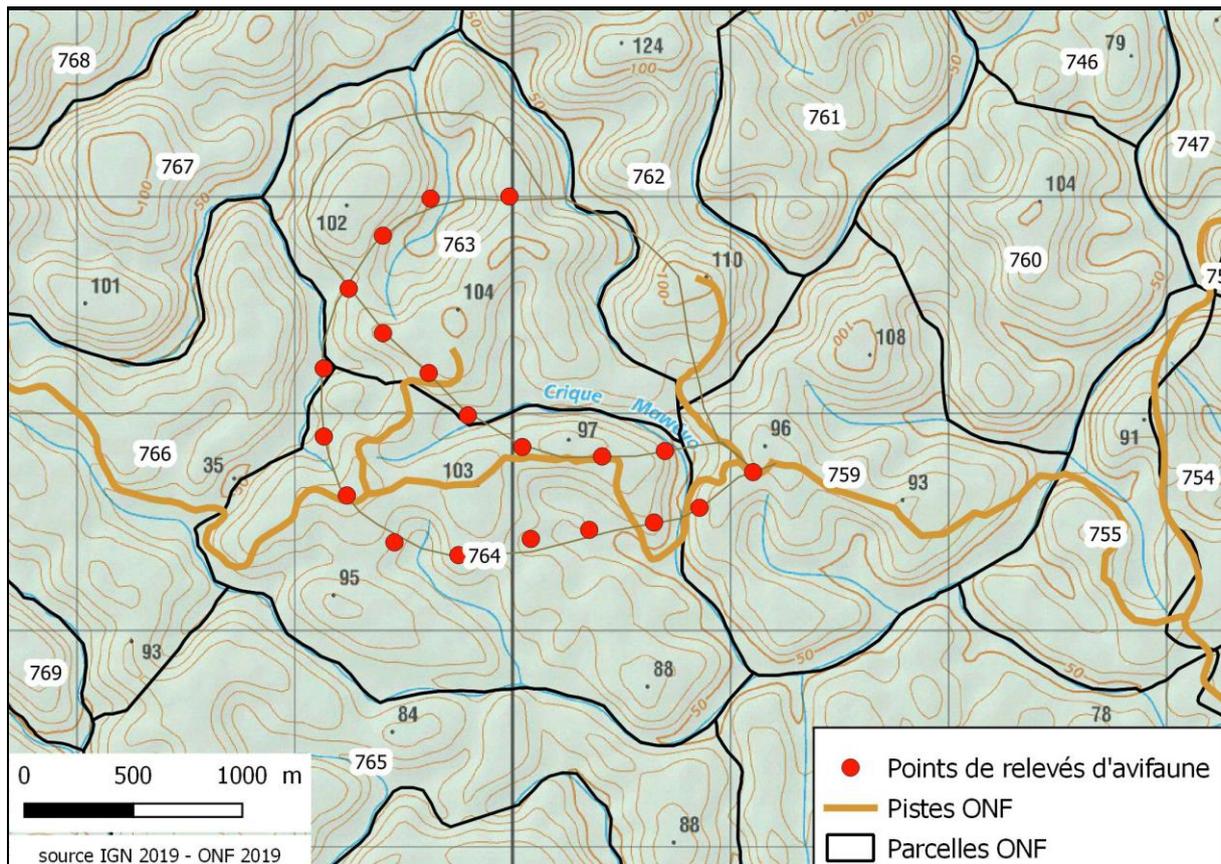


Figure 2 : Localisation des points d'observation sur le site exploité.

II. 5. L'avifaune des sites d'étude

Depuis les premières visites en 2014, 254 espèces d'oiseaux ont été dénombrées sur le site exploité et 235 espèces (plus 4 lors d'une visite ponctuelle en 2010) sur le site témoin. Ces richesses sont remarquables compte tenu de la surface explorée et placent les deux sites parmi les plus riches inventoriés en Guyane par nous-mêmes. La différence entre les deux sites s'explique pour partie par les facilités d'observation offertes par les pistes sur le site exploité, permettant de voir et d'identifier visuellement des oiseaux de canopée, difficiles à identifier à l'oreille et à voir sur le site témoin. Mises à part ces espèces dont on peut penser qu'elles sont présentes sur les deux sites, les espèces identifiées sur un seul site sont des espèces rares, peut-être seulement de passage sur le site, dont la rencontre est très aléatoire.

Les peuplements d'oiseaux sur les deux sites sont caractéristiques d'une forêt mûre de Guyane sur sol drainé. Ils sont décrits en détail et comparés par Claessens (2015), sur la base des premiers relevés du Suivi des oiseaux communs en 2014-2015. Les valeurs de diversité α et β calculées à partir de ces relevés montraient une légère différence de peuplement entre les deux sites, mais manquaient de précision en raison du faible nombre de données sur lesquelles elles se basaient. Elles sont recalculées plus loin à partir des données issues du projet EIEFAG (cf. chap. IV. 2.). Les cinq espèces les plus abondantes dans les relevés ponctuels sont les mêmes sur les deux sites. L'espèce dominante est le Piauhau hurleur (*Lipaugus vociferans*), trois fois plus abondant que l'espèce suivante, le Pigeon plombé (*Patagioenas plumbea*). Le Grisin de Todd (*Herpsilochmus stictocephalus*), le Trogon à queue noire (*Trogon melanurus*) et le Toucan à bec rouge (*Ramphastos tucanus*) n'arrivent que loin derrière. La moitié des espèces sont représentées sur l'ensemble des deux sites par moins de 10 individus sur un total de plus de 5000. Ces valeurs ne reflètent pas l'abondance réelle des espèces puisque leur détectabilité entre également en jeu, mais elle traduit malgré tout la très grande diversité des peuplements d'oiseaux des forêts tropicales.



Toucan à bec rouge (*Ramphastos tucanus*)

III. METHODES

III. 1. Relevés de terrain

Le protocole était calqué sur celui du Suivi des oiseaux communs en Guyane (STOC-EPS ; Julliard & Jiguet 2002, Claessens *et al.* 2015). Celui-ci a été conçu dans le but d'étudier les tendances démographiques à long terme des populations d'oiseaux communs. Il est basé sur la méthode des relevés ponctuels d'abondance, ou « points d'écoute ».

Les objectifs d'analyses statistiques quantitatives et de reproductibilité des observations imposent en effet l'utilisation d'une méthode de suivi standardisée. La technique des points d'écoute (selon la méthode des Indices ponctuels d'abondance, IPA, ou des Echantillonnages Ponctuels Simples, EPS) est l'une des plus simples à mettre en œuvre (contrairement aux captures). Elle a fait ses preuves dans toutes sortes de milieux tempérés ou tropicaux (Claessens 2000, de Longh & van Weerd 2006, Anjos 2007). Il s'agit d'une méthode d'échantillonnage qui ne prétend pas fournir un inventaire exhaustif de l'avifaune présente sur la zone étudiée mais qui, comparée à d'autres techniques, permet d'appréhender la plus grande diversité d'espèces, du sol à la canopée (Claessens 2000, Herzog *et al.* 2002, Derlindati & Caziani 2005). Sa principale contrainte est qu'elle nécessite une bonne maîtrise de la reconnaissance auditive des différentes espèces présentes sur la zone d'étude, maîtrise difficile à acquérir et par conséquent variable d'un observateur à l'autre, ce qui introduit un biais si l'observateur change au cours du temps.

Les comptages d'oiseaux pour le projet EIEFAG ont été effectués sur les points définis précédemment. Comme pour le STOC-EPS, ils ont consisté en relevés de 5 minutes exactement, durant lesquels tous les oiseaux vus ou entendus étaient notés de même que la distance de contact (<25 m, 25-100 m, >100 m, ou oiseau en transit). Un oiseau était « en transit » lorsqu'il ne faisait que traverser le site d'observation sans s'y arrêter. Les quelques oiseaux qui ont pu être contactés depuis deux points successifs n'ont pas eu d'influence sur les résultats puisque les analyses ont porté sur des données de présence/absence (données binaires) sans prendre en compte les effectifs.

Les relevés ont été effectués le matin entre 06h30 (afin d'avoir une luminosité suffisante pour voir les oiseaux en sous-bois) et 09h30, sauf exceptions. Des tests préalables à la mise en place du programme STOC-EPS en Guyane (Jourde & de Pracontal 2012) ont montré que l'activité vocale des oiseaux, et avec elle le nombre d'oiseaux contactés par relevé, déclinent fortement en moyenne 3 heures après l'aube. Ce constat rejoint celui fait par Claessens (2000) sur un site de forêt primaire, où le nombre d'espèces et le nombre d'individus contactés par points d'écoutes chutaient après 08h30 et après 09h30 respectivement. Le protocole STOC-EPS tient compte de cette phénologie, en limitant le créneau horaire des relevés ponctuels à 06h30-09h00. La même restriction horaire a été appliquée au projet EIEFAG, mais les difficultés physiques du terrain et la météo n'ont pas toujours permis de respecter cette limite. En effet, une pluie fine n'a pas d'effet sur l'activité des oiseaux forestiers, mais une pluie persistante ou plus intense réduit fortement leur

activité et surtout leurs chants ; les rares vocalisations émises deviennent inaudibles face au bruit généré par la pluie qui tombe sur le feuillage. La pluie contraint donc l'observateur à interrompre le parcours, repoussant d'autant l'heure des derniers relevés. Ainsi sur 480 relevés effectués, 394 (82 %) ont été effectués avant 09h00, 63 (13 %) ont été effectués entre 09h00 et 09h30, et 23 (5 %) ont été effectués après 09h30. 2 relevés ont même dépassé 10h30 à cause de la pluie. Ces relevés hors des limites horaires représentent une part infime des données. Il est à noter toutefois qu'un dépassement de l'heure limite n'est pas forcément préjudiciable à la qualité du relevé : tandis que les derniers relevés d'un parcours sont presque toujours moins riches que les premiers, certains relevés effectués après 09h30 se sont avérés plus riches que ceux effectués plus tôt en matinée. Les raisons de ces variations ne sont pas claires.

Ces contraintes horaires limitent à 10 le nombre de relevés ponctuels réalisables au cours d'une matinée, et par conséquent la répartition des points en parcours de 10 points.

Les observations effectuées de manière incidente entre deux points ou à d'autres moments de la journée sont venues alimenter l'inventaire global de l'avifaune, mais n'ont pas été prises en compte dans les analyses statistiques afin de ne pas biaiser les résultats.

III. 2. Plan d'échantillonnage et calendrier des relevés de terrain

L'objectif était de collecter, en 2018-2019, des données selon un plan d'échantillonnage intensif dans la durée du projet afin de calculer l'effort nécessaire et suffisant pour mesurer des variations d'abondance des espèces sur les sites étudiés. Le rythme des sessions de terrain est la principale différence du projet EIEFAG par rapport au STOC-EPS.

Les relevés de terrain se sont étalés entre juin 2018 et mars 2019. Six sessions ont été programmées dans cet intervalle sur chacun des deux sites, avec un intervalle d'environ 2 mois entre deux sessions et un intervalle moyen d'1 semaine entre les deux sites pour une même session (**tableau 1**). Les sessions 04 et 05 ont été un peu rapprochées pour des raisons de calendrier. Chacun des deux sites a donc reçu 6 visites, au cours desquelles les 20 points (2 parcours) ont été réalisés 2 fois successivement, ce qui représente un total de 4 matinées consécutives par site, répétées 6 fois au cours de l'étude, et 240 (20 points x 2 x 6 visites) relevés ponctuels par site.

Les réplicats spatiaux et temporels sont un élément important dans tout suivi de biodiversité car ils fournissent de l'information essentielle sur la variabilité des comptages. Sans information sur cette variabilité, il serait impossible d'estimer de façon fiable les paramètres de structure des peuplements, tels que la richesse et l'abondance spécifique ou encore les taux d'occurrence des espèces. Les réplicats permettent en outre de calculer l'incertitude associée aux estimations de ces paramètres.

L'information fournie par les réplicats est également essentielle pour pouvoir correctement estimer l'effort qui serait nécessaire à la détection des tendances d'abondance

d'espèces sur les sites étudiés. En effet, la calibration de l'effort dépend directement du taux de détection des espèces et de la variabilité de ce dernier.

Tableau 1 : Calendrier des sessions

Session	Site exploité	Site témoin
EIEFAG-01	18/06 - 21/06/2018	06/07 - 09/07/2018
EIEFAG-02	11/08 - 14/08/2018	21/08 - 24/08/2018
EIEFAG-03	16/10 - 19/10/2018	24/10 - 27/10/2018
EIEFAG-04	27/11 - 30/11/2018	11/12 - 14/12/2018
EIEFAG-05	16/01 - 19/01/2019	24/01 - 27/01/2019
EIEFAG-06	17/03 - 20/03/2019	28/03 - 31/03/2019

Ce plan d'échantillonnage tient compte des difficultés physiques du terrain, des contraintes logistiques et des autres missions de l'observateur. Il s'agit de l'effort maximal qu'il est possible d'allouer à ce type d'étude, sur un laps de temps aussi court. Il a été validé en amont par Aurélien Besnard, biostatisticien spécialiste de ces questions, en charge des analyses et de leur interprétation.

III. 3. Méthodes d'analyses

III. 3. 1. Analyses des peuplements

Nous avons testé des différences potentielles entre le site exploité et le site non exploité en terme (1) de diversité et (2) de composition d'espèces. La diversité de chaque site a été évaluée à partir de deux indices : l'indice de Shannon et la diversité bêta.

L'indice de Shannon, très utilisé en écologie est une mesure de diversité qui intègre l'information du nombre d'espèces (richesse spécifique) et de la fréquence relative d'occurrence de chaque espèce (équitabilité spécifique). Cet indice (H') est calculé de la façon suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i)$$

où i est une espèce du site auquel on s'intéresse, S est le nombre total d'espèces (richesse spécifique) et p_i est la proportion relative d'occurrence (ou d'abondance) de l'espèce i .

La diversité bêta est une mesure du taux de remplacement (= degré de dissimilarité) en composition d'espèces entre les deux sites. Plusieurs indices existent pour quantifier la diversité bêta. Ici, nous avons utilisé l'indice de similitude de Sørensen, une mesure relativement simple de la diversité bêta dont les valeurs peuvent aller de 0 à 1. Une valeur de 0 indique qu'il n'y a aucune espèce en commun entre les deux sites, tandis qu'une valeur de 1 indique que ce sont exactement les mêmes espèces qui existent dans les deux sites, soit une similitude de composition de 100%. Techniquement, l'indice de Sørensen (β) est défini de la façon suivante :

$$\beta = \frac{2c}{S_E + S_T}$$

où S_E est le nombre d'espèces au site exploité, S_T est le nombre d'espèces au site témoin et c est le nombre d'espèces communes aux deux sites.

III. 3. 2. Tests de puissance : calibration de l'effort requis

L'objectif principal de l'étude est de définir un protocole optimal pour le suivi des populations d'oiseaux des deux sites, apte à mettre en évidence d'éventuels changements au cours du temps. Cette analyse est basée sur des tests de puissance statistique à partir d'une étude de simulations. L'objectif de ces tests de puissance est de déterminer l'effort qui serait requis pour détecter un impact potentiel de l'exploitation forestière, avec un degré de certitude jugé suffisant. Notre capacité à détecter de tels impacts va dépendre (1) de l'intensité du suivi réalisé (ce que l'on cherche ici à optimiser), mais aussi (2) de la force de cet impact et (3) du nombre d'espèces affectées. Avant de pouvoir réaliser les tests de puissance et optimiser le suivi, il a donc fallu identifier des valeurs pertinentes pour ces deux derniers paramètres. Dans un premier temps, nous avons dû identifier quelles espèces, parmi la liste des espèces connues sur le site, seraient potentiellement affectées par l'exploitation et dans quelle mesure (baisse ou hausse). **L'identification des espèces cibles** (cf. paragraphe suivant) s'est faite à partir des connaissances extraites de la bibliographie et de notre expérience personnelle. Dans un second temps, il nous a fallu définir la **force d'impact** de l'exploitation forestière sur les espèces. Etant donné que nous ne connaissons pas ce paramètre *a priori*, nous avons évalué plusieurs scénarios pour représenter une gamme de force d'impact que l'on souhaiterait être en mesure de détecter avec le suivi. Cette gamme de valeurs représente des effets qui sont à la fois plausibles et écologiquement significatifs. Une fois que ces paramètres ont été définis, nous avons pu évaluer les différentes stratégies de suivis envisagées afin de sélectionner celles qui seraient les plus performantes pour détecter de tels effets. Les méthodes utilisées pour ces différentes étapes sont détaillées dans les paragraphes ci-après.

Identification des espèces cibles

Bien que les effets de l'exploitation forestière sélective soient généralement moins prononcés que ceux de la fragmentation de l'habitat ou du feu (Barlow *et al.* 2006), les espèces d'oiseaux sensibles à l'exploitation forestière sont globalement les mêmes que celles sensibles à la fragmentation du milieu forestier (Thiollay 1997, Burivalova *et al.* 2015).

Celles-ci sont désormais bien connues en Guyane comme ailleurs en région néotropicale (Stouffer & Bierregaard 1995, Claessens 2000, de Longh & van Weerd 2006, Vetter *et al.* 2011). Les données collectées ailleurs en Guyane dans des forêts secondaires plus ou moins dégradées et rassemblées dans la base de données participative Faune-Guyane (GEPOG 2019) apportent des éléments complémentaires sur les espèces susceptibles de se maintenir sur le site exploité, en dépit de leur sensibilité à la fragmentation du milieu. Ceci permet d'anticiper les effets attendus de l'exploitation forestière et de désigner les espèces cibles parmi celles qui ont été contactées sur nos sites d'étude au cours des relevés.

Les espèces sensibles appartiennent à des guildes particulières, et se caractérisent par leur régime alimentaire, leur strate de végétation dans laquelle elles vivent et dans une moindre mesure par leur taille (Mason 1996, Aleixo 1999, Claessens 2000, Vetter *et al.* 2011, Bregman *et al.* 2014, Burivalova *et al.* 2015). Les espèces insectivores terrestres ou du sous-bois seront les plus affectées, parmi elles celles constituant les rondes plurispécifiques et celles associées aux fourmis légionnaires ; ces dernières sont surtout sensibles à la fragmentation du milieu forestier, mais peuvent subsister dans des forêts dégradées tant que leur surface est suffisante pour abriter leurs vastes territoires ou domaines vitaux (Stouffer & Bierregaard 1995, Claessens 2000).

La masse corporelle intervient de façon différente en fonction des guildes : parmi les espèces terrestres ou du sous-bois, les plus grandes seront d'autant plus sensibles à la fragmentation car elles ont besoin d'un domaine vital plus étendu et d'un seul tenant que les petites espèces. A l'opposé, pour les oiseaux frugivores de canopée, la taille est un facteur favorable car elle détermine leur capacité à parcourir de grandes distances en milieu ouvert pour passer d'un fragment d'habitat à un autre, ou pour rechercher des sources de nourriture dans un milieu appauvri.

L'exploitation visant en priorité des arbres de grande taille, on peut s'attendre à ce que certains grands rapaces, ayant besoin d'arbres émergents pour établir leur nid, soient plus fortement impactés par ce type d'exploitation que par la fragmentation du milieu qui laisse des portions intactes de forêt. Un tel impact sera toutefois difficile à percevoir à travers des relevés ponctuels, car l'observation de ces espèces est rare et concerne le plus souvent des oiseaux en chasse ou en transit.

A l'inverse, les espèces nectarivores ou frugivores, les espèces vivant en canopée, seront moins affectées, voire favorisées. Les oiseaux nectarivores pourront en effet bénéficier d'une plus grande disponibilité en fleurs sur les lisières ou dans les ouvertures créées par l'exploitation. Les oiseaux liés aux chablis ou aux petites ouvertures dans la canopée devraient être favorisés, au moins à court terme. Enfin, quelques espèces qui affectionnent les lisières, les milieux ouverts ou pionniers, et qui sont absentes des forêts non perturbées pourront coloniser le milieu forestier à la faveur des pistes et ouvertures créées par l'exploitation.

En appliquant aux espèces contactées ces critères de sensibilité à l'exploitation forestière, on a pu établir une liste d'espèces pour lesquelles un effet est attendu. On a tenu compte du fait que l'exploitation programmée était peu intense et que l'étude viserait à identifier des effets à court terme, d'où des effets attendus atténués par rapport à une étude à plus long terme ou à une modification d'habitat plus drastique (Burivalova *et al.*

2015). Plusieurs catégories d'espèces ont été distinguées en fonction du type d'effet attendu et de sa force (**tableau 2**). Un effet est attendu sur 84 espèces, soit 43 % de celles détectées au cours de l'étude. 71 espèces (36 %) devraient subir une baisse d'occurrence et d'abondance, plus prononcée pour 12 d'entre elles ; soit 30% d'espèces qui subiraient une baisse modérée et 6% qui subiraient une baisse importante. 13 espèces (7 %) devraient au contraire être favorisées par l'exploitation. Enfin, 108 espèces (55 %) ne devraient pas être affectées, tandis que le sens de l'effet, positif ou négatif, est difficile à prévoir pour 5 espèces. Le **tableau 3** (p. 22) détaille les espèces pour lesquelles un effet est attendu.

Tableau 2 : Type d'effet et force de l'effet attendu sur les espèces d'oiseaux contactées.

Effet attendu	Nombre d'espèces	%
pas d'effet	108	54.8%
forte baisse	12	6.1%
baisse modérée	59	29.9%
augmentation	13	6.6%
incertain	5	2.5%
Total	197	100.0%

Définition du type d'impact

Pour les tests de puissance, nous nous sommes donc basés sur ces estimations pour définir des critères d'évaluations qui seraient utilisés pour mettre en évidence un effet « écologiquement significatif » de l'exploitation forestière. Les trois critères suivant ont été utilisés :

1. Critère 1 : Baisse Prononcée (BP). 10% des espèces connaissent une baisse prononcée d'occurrence sur les sites exploités.
2. Critère 2 : Baisse Prononcée ou Modérée (BP+BM). 6% des espèces subissent une baisse prononcée et 30% connaissent une baisse modérée.
3. Critère 3 : Augmentation Modérée (AM). 7% des espèces connaissent une augmentation modérée.

Les tests de puissance menés par la suite ont eu pour objectif d'évaluer le degré de certitude avec lequel on pourrait détecter ces trois différents types d'effet à partir de différentes modalités de suivi. En plus des espèces vivant en milieu forestier, on a également identifié un total de 16 espèces non forestières qui seraient susceptibles de venir coloniser le milieu suite à l'exploitation forestière. La liste de ces espèces colonisatrices potentielles est fournie dans le **tableau 3**. La présence et la détection de certaines de ces espèces colonisatrices a donc été utilisée comme un 4^e critère d'évaluation potentiel.

Définition quantitative de la force d'effet attendu

Après avoir déterminé la liste des espèces cibles, nous avons défini, quantitativement, la force d'impact que l'on veut être en mesure de détecter avec ce suivi d'espèces. Bien qu'il soit impossible de savoir précisément quelle force d'impact serait écologiquement significative, nous avons considéré une gamme d'effet allant de 5 % à 30 % de variation d'occurrence d'espèce. Cette gamme de valeur donne une fourchette pertinente à évaluer car :

1. Des effets supérieurs à 30 % sont si importants que toute forme de suivi, même minimaliste, devrait permettre de les mettre en évidence. Il ne serait en effet pas très judicieux de se lancer dans un suivi qui ne permettrait pas de détecter un déclin de 50%, par exemple. Investir dans un tel suivi serait une perte de temps.
2. A l'inverse, des variations, à la baisse ou à la hausse, inférieures à 5 % seraient certainement très coûteuses à détecter. D'un point de vue écologique, l'importance de ces effets étant relativement limitée, le rapport coût-bénéfice serait trop peu intéressant pour en justifier l'effort requis.

Dans le choix de la gamme d'effet évaluée, nous avons également tenu compte de la faible intensité de l'exploitation programmée, et du fait que l'étude viserait à identifier des effets à court terme. Nous avons donc défini trois scénarios de force d'impact, pour lesquels l'effort requis a ensuite été estimé à partir des tests de puissance. Ces trois scénarios évalués (voir **tableau 4**, p. 24) représentent les bornes basse, moyenne et haute de la force d'effet que l'on souhaite être en mesure de détecter au bout de deux ou trois années de suivi.

Stratégies et intensités de suivis évaluées

Les différentes stratégies évaluées s'inspirent directement du suivi réalisé en 2018-2019 décrit plus haut, mais à divers niveaux d'intensité d'observation. Pour toute stratégie, on considère que l'on suit deux sites : un site exploité et un site non exploité. Une stratégie de suivi est définie par la combinaison (1) du nombre de points d'écoute réalisés par site et (2) du nombre total de passages (toutes sessions confondues) réalisés sur chaque point. Pour les tests de puissance, nous avons testé 4 modalités différentes pour le nombre de points (10, 20, 30, 40) par site et 6 modalités pour le nombre de passages (2, 4, 6, 8, 10, 12), soit un total de **24 stratégies de suivi** (4 x 6).

Chacune de ces 24 stratégies évaluées a donc un niveau d'intensité d'observation propre, correspondant au nombre total de répétitions réalisées (nombre total de points d'écoute x nombre de passages). Par exemple, pour la stratégie de suivi consistant à faire 10 points d'écoute par site (soit 20 points au total, sur les 2 sites) et 4 passages par points, l'effort total est de 80 répétitions (4 x 20). Pour le suivi réalisé en 2018-2019, l'effort total était de 480 répétitions, consistant en 40 points d'écoutes au total (20 par site) et 12 passages par points (12 x 40 = 480).

Tableau 3 (continue page suivante) : Espèces pour lesquelles un effet est attendu.

Baisse prononcée	Baisse modérée		
Automolus infuscatus	Arremon taciturnus	Dixiphia pipra	Platyrinchus coronatus
Conopophaga aurita	Bucco capensis	Frederickena viridis	Schiffornis olivacea
Formicarius analis	Bucco tamatia	Geotrygon montana	Sclerurus rufigularis
Formicarius colma	Campylorhamphus procurvoides	Glaucidium hardyi	Spizaetus ornatus
Galbula albirostris	Celeus elegans	Jacamerops aureus	Terenotriccus erythrurus
Grallaria varia	Celeus torquatus	Lanio fulvus	Thamnomanes ardesiacus
Gymnopathys rufigula	Celeus undatus	Laniocera hypopyrra	Thamnomanes caesius
Hemitriccus zosterops	Corapipo gutturalis	Lepidothrix serena	Tinamus major
Hylexetastes perrotii	Crax alector	Leucopternis melanops	Tolmomyias assimilis
Hylopezus macularius	Crypturellus brevirostris	Lipaugus vociferans	Tunchiornis ochraceiceps
Myrmornis torquata	Crypturellus variegatus	Odontophorus gujanensis	Tyranneutes virescens
Pithys albifrons	Cymbilaimus lineatus	Penelope marail	Vireolanius leucotis
	Deconychura longicauda	Periporphyrus erythromelas	Willisornis poecilinotus
	Dendrocincla fuliginosa	Philydor erythrocerum	Xiphorhynchus pardalotus
	Dendrocolaptes certhia	Picus chrysochloros	

Tableau 3 (suite) : Espèces pour lesquelles un effet est attendu.

Augmentation	Colonisation
Dendrexetastes rufigula	Sporophila americana
Dryocopus lineatus	Sporophila castaneiventris
Florisuga mellivora	Sporophila minuta
Galbula dea	Todirostrum cinereum
Hypocnemis cantator	Poecilatriccus fumifrons‡
Legatus leucophaeus	Thamnophilus doliatus‡
Lophotriccus galeatus	Myrmophylax atrothorax‡
Notharchus tectus	Thraupis episcopus
Phaethornis ruber	Troglodytes aedon
Pheugopedius coraya	Melanerpes cruentatus
Piaya cayana	Campephilus melanoleucos
Ramphocelus carbo	Progne chalybea‡
Thraupis palmarum	Nyctidromus albicollis‡
	Cyclarhis gujanensis
	Rupornis magnirostris
	Lophotriccus galeatus*

‡Espèces ayant été observées sur le site, hors protocole.

*Lophotriccus galeatus a déjà été contacté sur le site exploité durant les relevés du protocole existant.

Tableau 4. Valeurs de force d'effet des différents scénarios évalués dans les tests de puissance.

Type d'effet	Espèces affectées		Force d'effet attendue, global (sur 2-3 ans)		
	Nombre	Proportion	Borne "Basse"	Effet "moyen" attendu	Borne "Haute"
Baisse prononcée	12	6.5%	-10%	-20%	-30%
Baisse modérée	55	30%	-5%	-10%	-15%
Augmentation	13	7.0%	+5%	+10%	+20%
Probabilité d'occurrence dans sites exploités					
Colonisation	Nombre d'espèces		Borne "Basse"	Moyenne	Borne "Haute"
	16		0.002	0.05	0.10

Tests de puissances

Pour résumer, nous avons évalué la puissance statistique pour :

- 1) 3 critères d'évaluation, s'inspirant directement des prévisions faites à dire-d'expert : la détection d'un effet dans le cas (i) d'une baisse prononcée (BP) sur 10 % des espèces, (ii) d'une baisse prononcée pour 6% des espèces et modérée pour 30 % des espèces (BP+BM) et (iii) d'une augmentation modérée (AM) sur 7 % des espèces.
- 2) 3 différents scénarios de force d'impact, dont les valeurs sont propres à chaque critère d'évaluation : (i) effet faible, (ii) effet intermédiaire et (iii) effet fort.
- 3) 24 stratégies de suivi.

Soit un total de 216 scénarios (3 x 3 x 24). Pour chacun de ces scénarios, la puissance statistique a été estimée à partir de 1000 simulations.

La puissance statistique est une mesure (en %) du degré de certitude avec lequel on est en mesure de détecter un effet donné (ici, la direction et la force d'effet du scénario en question), selon un plan d'échantillonnage donné (ici, la stratégie de suivi du scénario en question) et à partir d'un test statistique. Formellement, la puissance statistique est définie comme la probabilité de détecter un effet, sachant que cet effet est bel et bien réel. Elle correspond en fait à la valeur complémentaire ($1 - \beta$) de la probabilité (β) de rater un effet réel, que l'on appelle aussi l'erreur de type 2. En général, on considère qu'une puissance statistique est suffisante si elle est $\geq 80\%$, ce qui correspond à un seuil β d'erreur de type 2 de 20 %. C'est le seuil que nous avons utilisé pour sélectionner les stratégies de suivi suffisamment performantes.

La puissance statistique dépend de la force d'effet et de la taille d'échantillon (ici, l'intensité du suivi). Elle dépend aussi directement du seuil α (erreur de type 1) utilisé pour le test statistique. Le seuil α correspond à la probabilité de détecter un effet alors qu'il n'y en a pas, c'est-à-dire au risque de détecter un effet fallacieux. Nous avons choisi d'évaluer la puissance statistique pour 4 seuils α différents : 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. En science, un seuil α de 5 % est le plus couramment utilisé car on cherche à minimiser au maximum le risque de détecter des effets fallacieux (erreur de type 1). Mais dans un contexte de conservation de la biodiversité, le risque de commettre l'erreur inverse (type 2) est tout aussi important à considérer, voire plus important (Peterman 1990, Di Stefano 2003). En effet, l'erreur de type 2 correspond au risque de rater un vrai effet (par exemple, ne pas détecter le déclin d'une espèce), ce qui pourrait avoir des conséquences lourdes. Il est donc souvent souhaitable d'utiliser un seuil α plus élevé (Taylor & Gerrodette 1993), afin de réduire le risque β de rater un effet réel, et par conséquent d'augmenter la puissance statistique ($1-\beta$). Une approche souvent utilisée consiste alors à utiliser des seuils d'erreur α et β égaux. Ici, c'est ce que nous préconisons, en utilisant des seuils de 20 % pour chacun de ces deux types d'erreurs. Une stratégie de suivi est donc jugée suffisamment performante si sa puissance statistique, au seuil α de 20 %, est supérieure ou égale à 80 % ; autrement dit si cette stratégie permet de détecter l'effet envisagé dans au moins 80 % des cas.

Simulations

Pour chaque scénario, la puissance statistique est estimée en calculant le nombre de fois qu'un test statistique permet de correctement détecter l'effet de l'exploitation, à partir des données simulées selon la stratégie de suivi que l'on évalue, sur un total de 1000 simulations. Ici, le test statistique utilisé est un test de vraisemblance sur l'effet site (site exploité vs. site non exploité) réalisé à partir d'un modèle linéaire mixte généralisé (GLMM binomial). A chaque simulation, un nouveau jeu de données d'occurrences des espèces est généré, auquel le test statistique est ensuite appliqué. Chaque simulation a été réalisée selon la séquence suivante.

- D'abord, la probabilité d'occurrence, sur le site non exploité, de chacune des 186 espèces est tirée aléatoirement dans une loi exponentielle dont la forme est comparable à la distribution d'occurrences observée dans les données réelles (test d'ajustement du χ^2 : $\chi^2 = 9486$, $df = 9435$, $P = 0.35$; **figure 3**). Ensuite, les espèces affectées sont tirées aléatoirement, selon les proportions définies dans le **tableau 2** (p. 20). Cela permet de respecter le nombre d'espèces affectées identifiées tout en brassant leurs valeurs d'occurrence sur les sites non-exploités, afin d'éviter de sous-estimer l'incertitude dans nos prédictions. Ensuite, nous appliquons la force d'impact du scénario en cours d'évaluation et calculons le taux d'occurrence, sur le site exploité, de chacune des espèces affectées par l'exploitation. Pour plus de réalisme, nous ajoutons 10 % de variance sur les valeurs de force d'impact appliquées, de sorte à ne pas simuler exactement la même réponse pour toutes les espèces affectées. Chaque espèce a donc une réponse propre, qui est en moyenne centrée autour de la valeur de force d'impact simulée. Un exemple de distribution des forces d'impact appliquées est donné sur la **figure 4**.

- A partir des taux d'occurrence ainsi définis, les données d'occurrence de chaque espèce à chaque point d'écoute sont tirées selon une loi binomiale, dont le nombre de répétitions correspond au nombre de passages réalisés. Les données d'occurrence des espèces affectées sont ensuite analysées avec un modèle linéaire mixte généralisé (GLMM) binomial. Le modèle binomial utilisé inclut l'effet site que l'on cherche à mettre en évidence, ainsi qu'un effet aléatoire « espèce » pour tenir compte du fait que toutes les espèces affectées n'ont pas forcément la même intensité de réponse à l'exploitation. De cette analyse, nous extrayons (1) le coefficient estimé pour l'effet site et (2) la p-value associée, qui correspond au risque de commettre une erreur de type 1 dans le cas où il n'y aurait pas d'effet site. Pour une simulation donnée, on considère que l'effet a correctement été détecté si (1) le signe du coefficient estimé indique la bonne direction d'effet (ex : coefficient négatif pour le cas d'une baisse) et (2) la p-value est inférieure au seuil α choisi (5 %, 10 %, 15 % et 20 %). Si ces deux conditions sont remplies, nous incrémentons la valeur de la puissance statistique, au seuil α correspondant, de 1/1000. Après 1000 simulations, nous obtenons une estimation fiable de la puissance statistique, pour chacun des 4 seuils α considérés, pour le scénario en question.

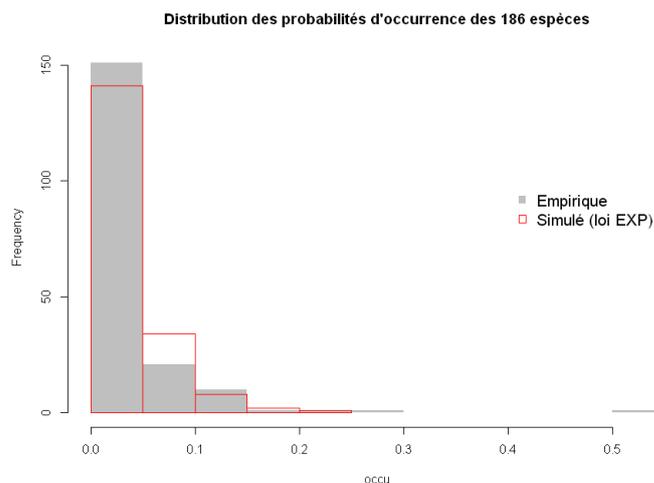


Figure 3. Distribution, réelle et simulée, des probabilités d'occurrence des 186 espèces

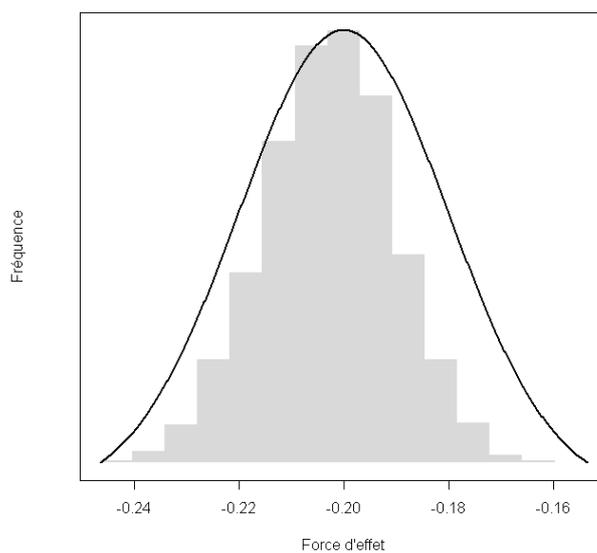


Figure 4. Exemple de distribution des forces d'impacts appliquées aux espèces affectées, lors d'une simulation. La force d'impact moyenne est de -20%, avec un coefficient de variation de 10% autour de cette moyenne.

Espèces colonisatrices

Pour les espèces colonisatrices, il n'y pas de test statistique associé. Nous avons donc calculé l'effort de suivi requis pour s'assurer de détecter, avec un degré de confiance élevé, un nombre minimum de ces espèces, si elles étaient amenées à coloniser le milieu perturbé. Nous avons considéré plusieurs scénarios, en faisant varier les différents paramètres qui influencent ces probabilités de détection, à savoir :

- 1) Le nombre total d'espèces colonisatrices effectivement présentes sur le site exploité, après 2 ou 3 ans d'exploitation. Le total utilisé est donc un sous-ensemble des 16 espèces listées dans le **tableau 3**. Nous avons évalué les cas suivant : présence de 5, 10 ou 15 espèces colonisatrices.
- 2) Le taux d'occurrence de ces espèces sur les points d'écoutes, lors des passages réalisés (= taux d'observation attendu) : 0.002, 0.005, 0.01, 0.05. Nous avons volontairement utilisés des taux très bas afin de refléter la réalité du terrain et être conservateur dans nos estimations. En effet, la plupart des espèces présentes dans le jeu de données sont rares. De plus, l'objectif serait de pouvoir détecter ces espèces très tôt dans le processus de colonisation, donc tant que leur occurrence est faible.
- 3) L'effort de suivi, qui correspond ici aussi au nombre total de réplicats spatio-temporels (points d'écoute x passages). Nous avons évalué 4 niveaux d'intensité de suivi incrémentiels : 100, 200, 400 et 1000 réplicats.

Pour chacun de ces scénarios, nous avons calculé la probabilité de détecter au moins 1, 2, 3 ou 5 espèces. Pour faire écho aux tests de puissance décrits ci-dessus, nous nous sommes fixés comme objectif de pouvoir détecter au moins 3 espèces colonisatrices avec une probabilité $\geq 80\%$.



© R. Jantot

Todirostre à front gris (Poecilatriccus fumifrons), une espèce colonisatrice des lisières broussailleuses, apparue sur le site exploité en 2019.

III. 4. Personnel impliqué dans l'étude

L'opérateur principal est un ornithologue professionnel confirmé, ayant 25 ans d'expérience avec l'avifaune guyanaise (précédée de 20 ans en France métropolitaine). Il a notamment étudié les effets de la fragmentation de l'habitat sur l'avifaune forestière autour du lac de Petit Saut (Claessens 2000), puis effectué de nombreuses missions d'inventaire de l'avifaune sur des sites dispersés dans toute la Guyane. Expert des chants d'oiseaux guyanais et de la méthode des points d'écoute, il coordonne le Suivi des oiseaux communs en Guyane (programme STOC-EPS ; Claessens *et al.* 2015). Il a effectué l'ensemble des relevés dans le cadre du projet EIEFAG.

L'opérateur principal était toujours accompagné sur le terrain d'une ou deux personnes : bénévoles, salariés du GEPOG ou agent de l'ONF, ces personnes ont bénéficié à cette occasion d'une formation à l'identification auditive des oiseaux et à la méthode des relevés ponctuels en forêt guyanaise. La plupart d'entre elles participent par ailleurs au Suivi des oiseaux communs en Guyane, en tant qu'observateur autonome ou en tant que candidat en cours de formation.

Les analyses statistiques et tests de puissance ont été réalisés par Thierry Chambert, Ingénieur de Recherche au Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) du CNRS de Montpellier. Il est spécialisé dans l'optimisation des plans d'échantillonnage et l'analyse de données de suivi d'espèces animales en milieu naturel.

III. 5. Archivage des données

Toutes les observations réalisées au cours de ce travail, qu'elles aient été collectées dans le cadre du protocole ou de manière incidente hors protocole, ont été saisies dans la base de données Faune-Guyane, plateforme naturaliste participative en ligne (www.faune-guyane.fr ; GEPOG 2019). Elles sont accessibles au public et peuvent être réutilisées pour d'autres études répondant aux objectifs et à la déontologie de Faune-Guyane. Elles seront intégrées au SINP quand des difficultés pratiques auront été surmontées.



Jacamar à bec jaune
(*Gabula albirostris*)

© O. Claessens

IV. RESULTATS

IV. 1. Bilan général

Les 480 relevés ponctuels réalisés ont permis de collecter 4091 données. Elles concernent 197 espèces (169 espèces sur le site exploité, 164 espèces sur le site témoin, soit respectivement 72 % et 65 % des peuplements) et un total de 5052 individus identifiés spécifiquement. 216 individus n'ont pu être identifiés à l'espèce et sont exclus des analyses. De même, les individus détectés en vol ou à >100 m de distance ont été exclus des analyses pour éviter les biais dus aux différences de détections entre les sites. Les analyses ont donc porté sur un total de 186 espèces détectées à moins de 100 m de distance, dont 158 espèces sur le site exploité et 154 espèces sur le site témoin.

La différence entre les deux sites dans la proportion d'espèces contactées au cours des relevés ponctuels appuie l'hypothèse selon laquelle les espèces qui manquent à l'inventaire du site témoin sont des espèces difficiles à voir et/ou à identifier à l'oreille. C'est notamment le cas de la majorité des oiseaux appartenant à la famille des Thraupidés, une famille de passereaux vivant essentiellement en canopée et au sein de laquelle une grande proportion des contacts auditifs restent indéterminés.

Les sessions 4 et 5 ont été beaucoup plus pauvres que les autres, tant en nombre d'espèces qu'en nombre d'individus comptés, et ce pour les deux sites (**figure 5**). Cette différence est statistiquement significative (ANOVA : $P < 0.001$). Elle s'explique par la météo qui a été particulièrement défavorable au cours de ces deux sessions, et par le dépassement systématique de l'heure limite définie par le protocole. Indépendamment de l'heure, les relevés ont été sensiblement plus pauvres en oiseaux qu'au cours d'une session « normale », ce que la météo (vent, pluie) suffit à expliquer. De même les conditions générales ont été moins favorables au cours de la session 2 sur le site témoin, expliquant la baisse constatée sur ce site.

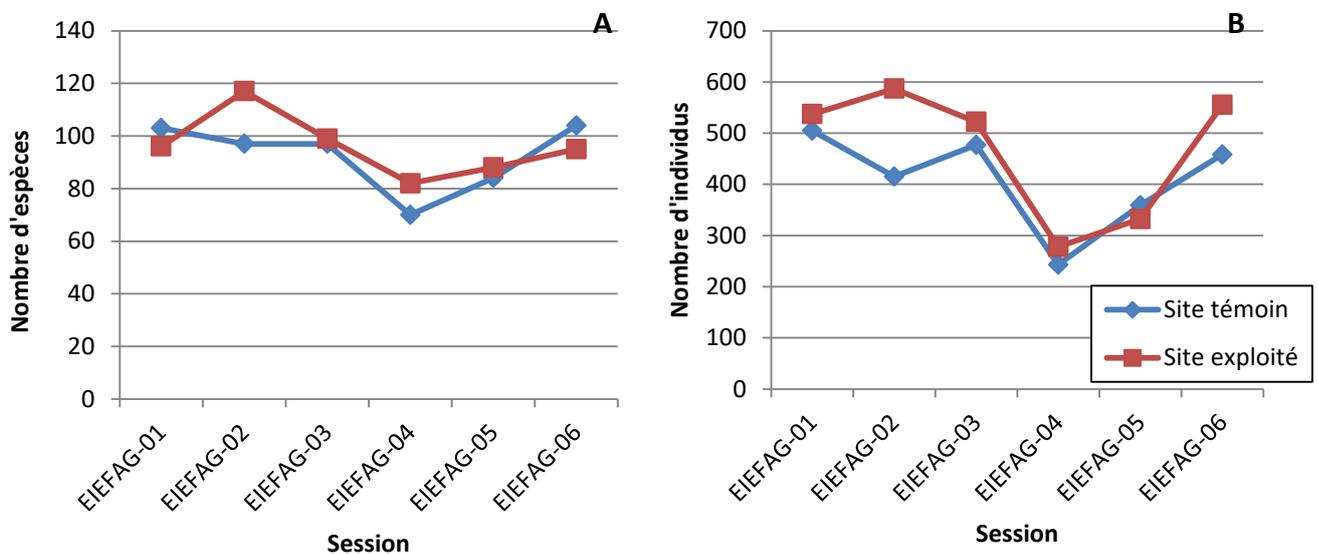


Figure 5 : Variations du nombre d'espèces (A) et du nombre d'individus (B) contactés par session sur les deux sites.

IV.2. Structure des peuplements d'oiseaux : diversité et composition d'espèces

A ce jour, aucune différence nette de diversité ni de composition d'espèces n'a pu être mise en évidence entre les deux sites, mais ce résultat était attendu car l'exploitation forestière n'est en place que depuis récemment.

En termes de diversité d'espèces, les indices de Shannon sont de 6.13 et 6.10 pour le site exploité et le site non exploité, respectivement, ce qui est très similaire. La diversité bêta (indices de Sørensen) est quant à elle égale entre les deux sites, sa valeur étant de 0.987. Cela signifie que les deux peuplements ont le même taux d'hétérogénéité et que cette hétérogénéité est extrêmement faible. Aucune différence de structure entre les deux sites ne peut donc être mise en évidence à ce stade. La diversité bêta calculée entre les deux sites vaut quant à elle 0.765, une valeur proche de celle calculée à partir des données STOC-EPS de 2014-2015 (soit 0.788 ; Claessens 2015). La divergence des peuplements d'oiseaux des deux sites est donc de 23 %. Les espèces rares, dont l'observation est aléatoire, expliquent cette divergence qui peut sembler importante mais qui reste donc superficielle.

En termes de composition des communautés, une analyse interclasse distinguant le site exploité du site non exploité n'explique que 1.4% de la variance de composition en espèces entre les deux sites (**figure 6**) ; cette approche ne permet donc pas de différencier à ce stade les deux sites. En raison du développement très progressif de l'exploitation, nous attendons à observer des effets après quelques années d'exploitation seulement.

Sur la **figure 6**, les points noirs représentent les données espèces projetées sur le même système de coordonnées. On remarque un chevauchement important des points d'écoute des deux sites (graphe A). De plus, les centres de gravité de chacun des sites sont très proches et à proximité du centre des deux axes (0,0). Cela indique qu'il n'y a aucune différence nette entre les deux sites en termes de composition d'espèces.

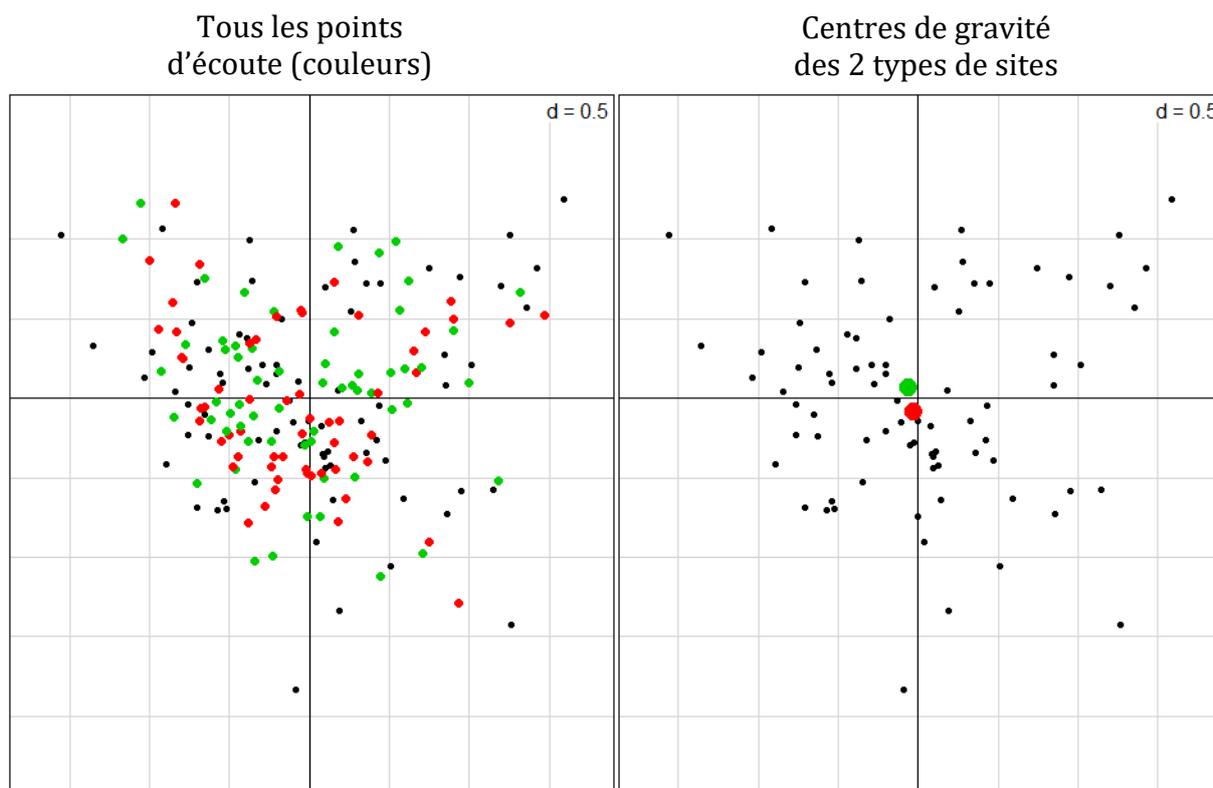


Figure 6. Projection des données espèces et points d'écoute sur les deux axes principaux issus de l'analyse interclasse distinguant les points d'écoute du site exploité (points rouges) de ceux du site non exploité (points verts).

IV. 3. Calibration de l'effort requis

Pour le premier critère d'évaluation de l'effet exploitation (baisse prononcée: BP), les tests de puissances indiquent qu'avec un effort tenable on serait en mesure de détecter un effet de force intermédiaire, c'est-à-dire une baisse d'occurrence de 20 % sur les 10 % d'espèces concernées (**tableau 5**). Pour remplir cet objectif, le suivi optimal consisterait à réaliser 30 points d'écoute par site, avec 10 passages par points. Ces passages (= répliquats temporels) peuvent être répartis sur plusieurs saisons, voire plusieurs années. L'effort total requis est alors de 600 répliquats spatio-temporels (points x passages) répartis sur les deux sites, et la puissance statistique associée, au seuil α de 20%, est de 81% (Annexes : **tableau A1**). Pour ce même scénario, si l'on se base sur des seuils α décroissants de 15 %, 10 % et 5 %, la puissance statistique passe alors à 75%, 68% et 56%, respectivement. Cela confirme bien qu'il serait peu judicieux d'utiliser un seuil α aussi exigeant que ce qui est fait en science ($\alpha = 5 %$). Pour la suite de la rédaction, nous nous basons donc sur des seuils α de 20% comme nous l'avons discuté et justifié dans la partie Méthodes. Dans le cas d'une baisse plus importante (-30%), on pourrait se permettre de réduire l'effort à 200 répliquats spatio-temporels, ce qui nous assurerait une puissance de 85 %. Le suivi en question consisterait en 10 points d'écoute par site, avec 10 passages. Enfin, nous notons qu'il serait difficile de

détecter un effet de force faible (baisse de 10 %) avec un suivi qui soit logistiquement tenable. En effet, pour ce scénario, la puissance maximale atteinte, pour la gamme des efforts de suivi évalués, est de 50 % seulement, ce qui est très peu. Cela requerrait de réaliser 960 réplicats, soit 40 points par site avec 12 passages. Et même avec cet effort élevé, on aurait toujours 50 % de chance de rater un effet aussi faible.

Tableau 5 : Effort requis pour détecter une baisse prononcée (critère 1), selon 3 scénarios de force d'effet (en ligne).

<u>Critère 1: Baisse prononcée sur 10% des espèces</u>			
Scénario	Baisse : 10% des espèces	Effort requis (points x passages)	Suivi recommandé
Effet Faible	-10%	> 1000	Intenable
Effet Intermédiaire	-20%	600	30 points par site 10 passages
Effet Fort	-30%	200	10 points par site 10 passages

En se basant sur le second critère d'évaluation (BP+BM), les tests de puissance pointent vers un suivi très similaire à celui qui a été réalisé en 2018-2019. Pour détecter une baisse de force intermédiaire, c'est-à-dire -10 % pour 30 % des espèces et -20 % pour 6 % des espèces, un effort total de 480 réplicats spatio-temporels serait requis (**tableau 6**). Des options adéquates seraient donc de faire 20, 30 ou 40 points d'écoutes par site, avec 12, 8 ou 6 passages, respectivement. La puissance associée serait de 80%. Pour détecter un impact de force plus importante (-15 % et -30 %), 10 points d'écoute par site répétés 8 fois seraient probablement suffisants (puissance = 79 % ; Annexes : **tableau A2**). En revanche, là encore, il serait illusoire d'espérer pouvoir détecter un effet de force faible (-5 % et -10 %), la puissance maximale atteinte, pour un suivi impliquant 960 réplicats, étant de seulement 57 %.

Pour le dernier critère (augmentation modérée: AM), les tests indiquent qu'aucun effort réaliste ne permettrait vraiment de détecter un tel effet, même s'il est de force élevée (+20 %), avec un bon degré de certitude (**tableau 7**). En effet, l'effort le plus important envisagé (960 réplicats) ne permet d'atteindre qu'une puissance de 73 % seulement (Annexes : **tableau A3**), ce qui n'est pas négligeable mais ne remplit pas nos objectifs. Donc le rapport coût (effort élevé) / bénéfique (chance de détecter un effet, même élevé) ne semble pas justifier l'utilisation de ce critère comme indicateur fiable pour tester l'effet de l'exploitation forestière sur la communauté d'oiseaux. Des analyses complémentaires nous ont permis de trouver qu'il serait nécessaire d'investir dans un effort supérieur à 1100 réplicats pour atteindre une puissance de 80% (Annexes : **tableau A4**).

Tableau 6 : Effort requis pour détecter un déclin dans le cas d'une baisse prononcée et modérée (critère 2), selon 3 scénarios de force d'effet (en ligne).

Critère 2: Baisse Prononcée sur 6% des espèces et Baisse Modérée sur 30% des espèces

Scénario	Espèces fortement sensibles : 6%	Espèces modérément sensibles : 30%	Effort requis (points x passages)	Suivi recommandé
Effet Faible	-10%	-5%	> 1000	Intenable
Effet Intermédiaire	-20%	-10%	480	30 points par site 8 passages
Effet Fort	-30%	-15%	160	10 points par site 8 passages

Tableau 7 : Effort requis pour détecter une augmentation modérée (critère 3), selon 3 scénarios de force d'effet (en ligne)

Critère 3: "Augmentation modérée " sur 7% des espèces

Scénario	Augmentation : 7% des espèces	Effort requis (points x passages)	Suivi recommandé
Effet Faible	+5%	> 1000	Intenable
Effet Intermédiaire	+10%	> 1000	Intenable
Effet plus Fort	+15%	> 1000	Intenable
Effet Fort	+20%	> 1000	Intenable

IV. 4. Relation Effort-Puissance

A partir de ces résultats, nous avons estimé et tracé des courbes représentant la relation entre l'effort de suivi et la puissance statistique pour chacun des trois critères évalués (**figures 7 à 9**), dans le cas d'un effet de force intermédiaire. Ces relations, dont la qualité prédictive est très forte ($r^2 > 0.99$), nous permettent d'affiner nos choix quant au suivi optimal à recommander. Pour le premier critère, la relation prédit qu'un effort de 580 réplicats est nécessaire pour atteindre une puissance de 80 %. Pour minimiser l'effort au maximum, on pourrait donc décider de réaliser 29 points d'écoute par site (soit 58 au total) avec 10 passages ($58 \times 10 = 580$). Techniquement cela revient quasiment au même que de faire 30 points d'écoute par site (donc 600 réplicats), comme le tableau nous amenait à le

conclure. Pour le second critère, la courbe de la **figure 8** nous oriente vers un effort optimal de 500 répliquats, et pour le troisième critère, on voit qu'il serait nécessaire de pousser jusqu'à 1120 répliquats pour atteindre notre seuil de puissance minimale de 80 % (**figure 9**), ce qui est très coûteux.

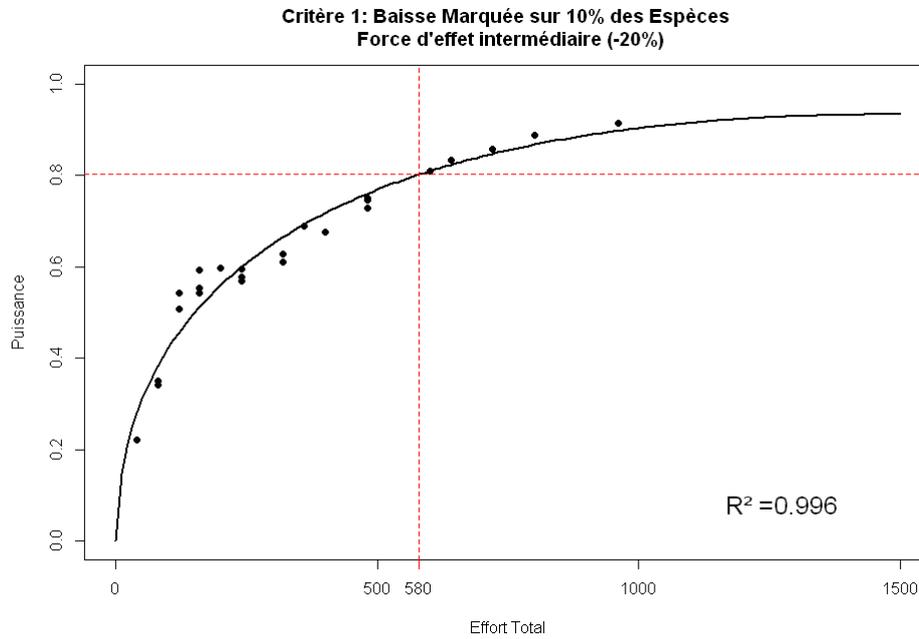


Figure 7 : Relation entre effort de suivi et puissance statistique, pour le critère 1.

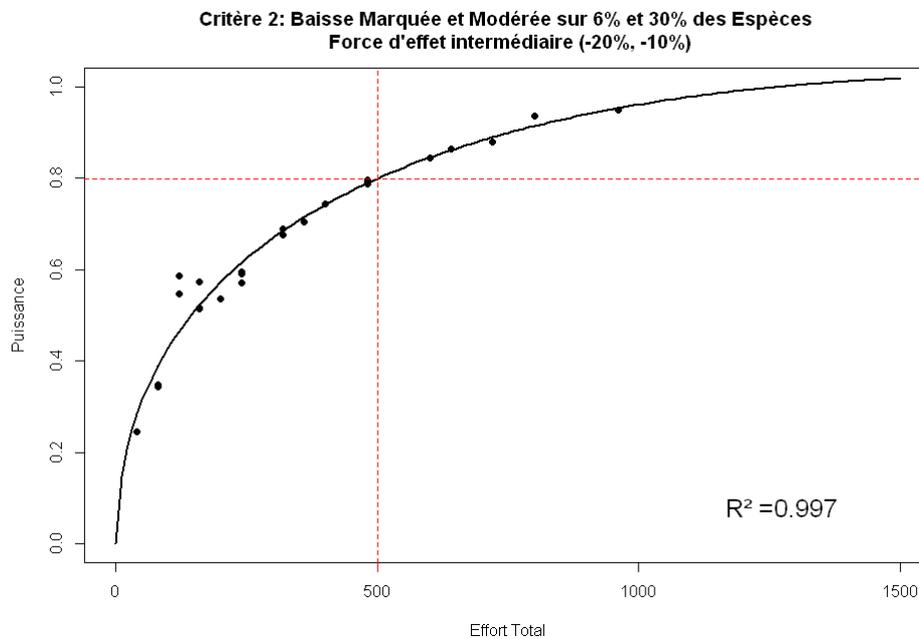


Figure 8 : Relation entre effort de suivi et puissance statistique, pour le critère 2.

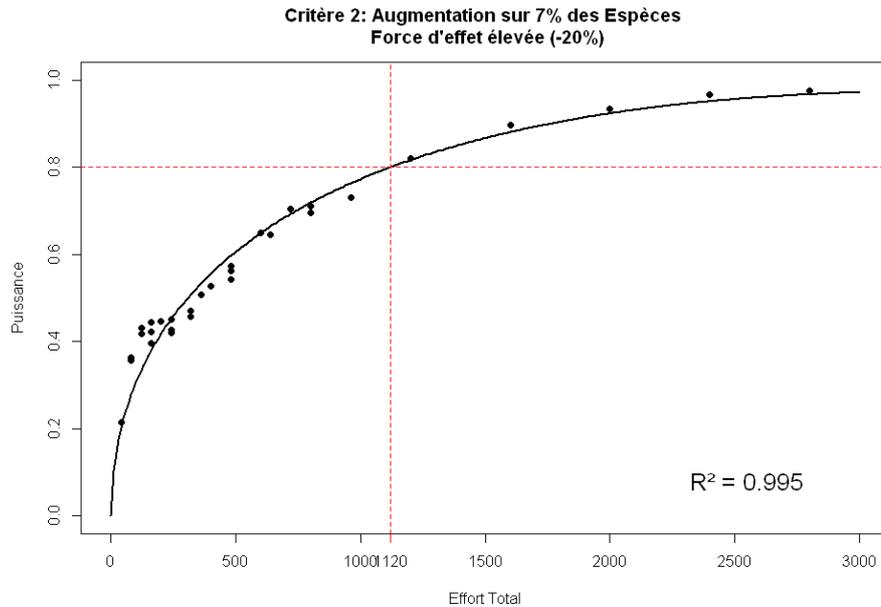


Figure 9 : Relation entre effort de suivi et puissance statistique, pour le critère 3.

IV. 5. Espèces colonisatrices

Les probabilités de détection d'espèces colonisatrices, pour les différents scénarios envisagés, sont présentées dans les **tableaux 8 à 10**. En se basant sur un scénario où 10 nouvelles espèces coloniseraient le site exploité, avec une occurrence d'environ 1 %, on pourrait assez facilement s'assurer d'en détecter plusieurs, avec un effort de suivi relativement modérée. Par exemple, avec seulement 200 répliqués, soit par exemple 10 points d'écoute par site avec 10 passages, on aurait 88 % de chance de détecter au moins 5 de ces nouvelles espèces, et 99 % de chance d'en détecter au moins 3 (**tableau 9**).

Globalement, les résultats indiquent que les probabilités de détection d'espèces colonisatrices sont faibles tant que (1) il y a très peu d'espèces colonisatrices présentes sur le site exploité, (2) leurs taux d'occurrence sont extrêmement faibles (< 0.5 %) et (3) l'effort de suivi reste faible (< 400 répliqués). Dès qu'un de ces paramètres augmente, même modérément, la détectabilité devient vite très élevée, nous assurant ainsi de pouvoir détecter ce changement lié à l'ouverture du milieu. Par exemple, en se basant sur les 16 espèces colonisatrices potentielles que nous avons identifiées, et sur un taux d'occurrence moyen de 1 %, on sait qu'avec un effort de seulement 200 répliqués on aurait 80 % de chance de détecter au moins 9 de ces espèces, ce qui est excellent. En comparant cela au site non exploité où ces espèces sont absentes, il serait alors aisé de mettre en évidence la causalité de l'exploitation forestière dans l'arrivée de tant de nouvelles espèces.

Nous concluons donc que la détection d'un minimum de 3 à 5 espèces colonisatrices serait un critère performant pour capter l'effet exploitation efficacement. A partir de ce critère, un effort de suivi de 200 répliqués, soit 5 passages réalisés sur 20 points d'écoute par site, serait alors amplement suffisant. Avec les niveaux d'intensité de suivi préconisés dans la partie précédente, soit 30 points d'écoute par site avec 8 à 10 passages, nous sommes assurés de pouvoir couvrir ce critère-là également. Il sera donc un bon indicateur en complément des tests de baisse d'occurrence.

Tableau 8 : Probabilités de détection dans le cas où 5 nouvelles espèces coloniseraient le site exploité.

Occurrence	Effort total (sur les 2 sites)	Probabilité de détecter au moins...			
		1 espèce	2 espèces	3 espèces	5 espèces
0.002	100	0.39	0.07	0.01	0
0.002	200	0.63	0.23	0.04	0
0.002	400	0.86	0.53	0.2	0
0.002	1000	0.99	0.94	0.74	0.1
0.005	100	0.71	0.31	0.08	0
0.005	200	0.92	0.65	0.31	0.01
0.005	400	0.99	0.94	0.74	0.1
0.005	1000	1	1	1	0.65
0.01	100	0.92	0.65	0.31	0.01
0.01	200	0.99	0.94	0.74	0.1
0.01	400	1	1	0.98	0.49
0.01	1000	1	1	1	0.97
0.05	100	1	1	1	0.67
0.05	200	1	1	1	0.97
0.05	400	1	1	1	1
0.05	1000	1	1	1	1

Tableau 9 : Probabilités de détection dans le cas où 10 nouvelles espèces coloniseraient le site exploité.

Occurrence	Effort total (sur les 2 sites)	Probabilité de détecter au moins...			
		1 espèce	2 espèces	3 espèces	5 espèces
0.002	100	0.63	0.25	0.06	0
0.002	200	0.86	0.57	0.27	0.02
0.002	400	0.98	0.89	0.69	0.21
0.002	1000	1	1	0.99	0.88
0.005	100	0.92	0.69	0.39	0.05
0.005	200	0.99	0.95	0.82	0.35
0.005	400	1	1	0.99	0.88
0.005	1000	1	1	1	1
0.01	100	0.99	0.95	0.82	0.35
0.01	200	1	1	0.99	0.88
0.01	400	1	1	1	1
0.01	1000	1	1	1	1
0.05	100	1	1	1	1
0.05	200	1	1	1	1
0.05	400	1	1	1	1
0.05	1000	1	1	1	1

Tableau 10 : Probabilités de détection dans le cas où 15 nouvelles espèces coloniseraient le site exploité.

Occurrence	Effort total (sur les 2 sites)	Probabilité de détecter au moins...			
		1 espèce	2 espèces	3 espèces	5 espèces
0.002	100	0.78	0.43	0.17	0.01
0.002	200	0.95	0.79	0.53	0.12
0.002	400	1	0.98	0.92	0.58
0.002	1000	1	1	1	1
0.005	100	0.98	0.88	0.68	0.22
0.005	200	1	0.99	0.97	0.77
0.005	400	1	1	1	1
0.005	1000	1	1	1	1
0.01	100	1	0.99	0.97	0.77
0.01	200	1	1	1	1
0.01	400	1	1	1	1
0.01	1000	1	1	1	1
0.05	100	1	1	1	1
0.05	200	1	1	1	1
0.05	400	1	1	1	1
0.05	1000	1	1	1	1



© O. Claessens

Microtyran casqué (Lophotriccus galeatus)

IV. 6. Bilan des tests de puissance

Une bonne stratégie consisterait à focaliser les analyses et tests statistiques (1) sur les espèces pour lesquelles on prédit une baisse d'occurrence et d'abondance, qu'elle soit prononcée ou modérée, en plus (2) des espèces colonisatrices. Un protocole optimal impliquerait de suivre environ 30 points d'écoute par site, et de réaliser entre 8 et 10 passages sur ces points. Cet effort pourra être étalé sur un pas de temps de 1 à 3 ans.

Dans le cas où des limites de temps ou de budget nous forceraient à diminuer l'intensité de suivi, nous pourrions assez confortablement réduire le nombre de points d'écoute par site de 30 à 20 points, voire 10 seulement, tout en gardant 10 réplicats temporels. Dans le premier cas de figure où on passerait à 20 points par site, on aurait toujours 68 % de chance de détecter une baisse de force intermédiaire selon le premier critère (BP), et 74 % selon le second critère (BP+BM). De plus, notre capacité à détecter une baisse de force plus importante serait toujours très bonne. La puissance serait de 92 % selon le premier critère, et de 95% selon le second critère. Dans le cas où l'on réduirait le suivi à seulement 10 points d'écoute par site, on serait également en mesure de détecter un effet de force importante, avec une puissance de 85 % selon le premier critère et 79 % selon le second.



Pipromorpe de McConnell (Mionectes maconnelli)

V. CONCLUSIONS

V. 1. Succès et perspectives du projet EIEFAG

Le projet EIEFAG visait à combler une lacune dans les dispositifs de suivi de l'avifaune en Guyane, en définissant un protocole permettant d'évaluer à relativement court terme les impacts d'une perturbation du milieu à l'échelle d'un site particulier. Le Suivi des oiseaux communs, mis en place en Guyane depuis 2012, est destiné à mesurer les variations d'abondance des espèces à grande échelle, mais n'est pas adapté, dans son déploiement actuel, à une étude locale.

La méthode utilisée pour ce travail, consistant en des tests de puissance statistique calibrés à partir de l'information fournie par des données collectées selon un plan d'échantillonnage intensif, est novatrice en Guyane en permettant d'anticiper l'efficacité du protocole en fonction de l'effort déployé. En s'adjoignant les compétences d'un biostatisticien spécialiste des protocoles de suivi des populations animales, le projet EIEFAG apporte les garanties de fiabilité et de robustesse du protocole ainsi défini.

A partir de différents scénarios envisagés d'effets de l'exploitation forestière sur l'avifaune, le projet EIEFAG a permis de définir l'effort à déployer pour mettre en évidence ces effets, et les probabilités associées en fonction des cas. Le protocole qui sera choisi pour suivre l'évolution des peuplements d'oiseaux et évaluer ainsi les effets de l'exploitation dépendra des moyens humains et financiers alloués au suivi et des objectifs visés, c'est-à-dire du seuil de probabilité qui sera jugé satisfaisant pour détecter un effet. Par cette démarche, on admet donc un risque de ne pas détecter un effet. Les tests ont montré que ce risque est faible pour une baisse modérée des espèces, et avec un effort raisonnable.

L'effet le plus facile à détecter sera l'apparition d'espèces colonisatrices, bien que leur nombre potentiel soit réduit. Sur les 16 espèces potentiellement colonisatrices identifiées dans la liste des oiseaux de Guyane, 5 sont déjà apparues sur le site exploité trois ans après l'ouverture des premières pistes, et l'une d'entre elle (*Microtyran* casqué, *Lophotriccus galeatus*) a été effectivement contactée par les points d'écoute. Les diminutions d'abondance pour les espèces sensibles aux perturbations du milieu sont plus délicates à mettre en évidence et nécessitent un effort plus grand, qui dépend du niveau de la baisse et du degré de certitude (probabilité) que l'on souhaite, mais restent détectables avec une bonne probabilité. L'effort nécessaire pour y parvenir, défini par les tests de puissance, est d'autant plus réaliste qu'il peut être étalé sur deux voire trois ans, au lieu de 8 mois pour les relevés de terrain réalisés dans le cadre de ce travail. Avec une durée plus longue, on augmente également l'ampleur de l'effet attendu, et la probabilité de détecter cet effet, tout en réduisant l'effort requis chaque année.

V. 2. Effets indirects de l'exploitation forestière

Les effets de l'exploitation forestière au sens strict sont difficiles à dissocier de ceux de la chasse qui se superpose très souvent à l'exploitation (Thiollay 1997, Roopsind *et al.* 2017). Les chasseurs tirent profit des pistes qui sont ouvertes pour l'exploitation forestière, qui leur donnent accès à de vastes zones riches en gibier car peu chassées auparavant. L'effet de la chasse se prolonge longtemps après que l'exploitation ait cessé (Thiollay 1997). Cet effet collatéral est systématique en Guyane, de sorte que le gestionnaire doit en tenir compte dans l'évaluation des impacts de son activité sur la faune. Le fait de ne pouvoir le dissocier de l'effet de l'exploitation *sensu stricto* n'est donc pas gênant pour l'interprétation des résultats. Nos deux sites d'étude sont tous deux soumis à une pression de chasse qui, bien qu'elle n'ait pas été mesurée, est vraisemblablement du même ordre de grandeur et vise les mêmes espèces gibier. Si l'on observe une évolution différente des peuplements d'oiseaux sur les deux sites, celle-ci sera donc attribuable en grande partie à la transformation du milieu, c'est-à-dire à l'exploitation forestière.

V. 3. Réplicabilité et transposition des résultats à d'autres sites ou modes de gestion

Les espèces forestières contactées sur les deux sites d'étude sont des espèces communes sur l'ensemble du bloc forestier guyanais, avec des fréquences à peu près homogènes dans les relevés par points d'écoute (observations personnelles, non publiées). Les résultats de notre travail réalisé dans une forêt de l'Est guyanais seront donc en tous points applicables sur d'autres sites forestiers sur l'ensemble du territoire.

Nos tests ont concerné deux sites comparatifs : dans le cas étudié, les effets de l'exploitation forestière émergeront de la comparaison entre un site exploité et un site témoin, à un moment donné. Cependant, l'existence d'un site témoin n'est pas une condition indispensable : les effets d'une modification du milieu peuvent également être mis en évidence par un suivi temporel du site exploité. C'est le principe sur lequel repose le STOC-EPS, Suivi temporel des oiseaux communs (Julliard & Jiguet 2002). Dans ce cas, la comparaison portera sur le même site à deux moments différents, avec un effort identique pour chacune des périodes, égal à celui qui devrait être déployé sur chacun des sites dans le cas d'une comparaison spatiale. Ainsi, si l'effort théorique doit être étalé sur deux ans, on comparera deux périodes de deux ans chacune, et l'intervalle entre les deux périodes équivaudra à la durée de perturbation dont on veut mesurer les effets.

Les tests de puissance ont été basés sur une proportion d'espèces affectées, indépendamment de leur identité spécifique. Leur écologie a été prise en compte pour prédire leur degré de sensibilité à une perturbation du milieu, mais une fois cette sensibilité définie, leur identité propre n'intervient plus dans les calculs. Par conséquent, il est possible de remplacer dans nos tests des espèces forestières par des espèces de milieu ouvert, pour autant que la proportion d'espèces affectées par une modification du milieu sera équivalente à celle prédite dans le cas présent. Les cas d'étude pourraient être différents types d'exploitation agricole ou de gestion. La proportion attendue d'espèces affectées est toutefois difficile à définir sans un examen des espèces en présence et sans une estimation

de leur détectabilité. Une étude préalable basée sur des réplicats visant à mesurer la détectabilité des espèces, comme celle menée dans le projet EIEFAG, sera donc indispensable si l'on change d'écosystème.

V. 4. Contributions aux besoins et priorités du territoire

Avec une pression démographique très forte mais concentrée sur une étroite bande côtière, la Guyane est en recherche d'un modèle de développement qui préserve son patrimoine naturel exceptionnel tout en répondant aux besoins de la population. La plus grande partie du territoire étant recouvert par la forêt tropicale, l'exploitation de la ressource forestière fait partie des pistes de développement prioritaires de la Guyane. Outre l'exploitation d'essences très recherchées pour le bois d'œuvre, le bois-énergie apparaît comme une source d'énergie renouvelable prometteuse (ONF-CIRAD 2007). Plusieurs projets de centrale à biomasse ont vu le jour ces dernières années.

La forêt guyanaise est cependant l'une des mieux préservées du continent (Turner & Corlett 1996). Elle héberge plus de 400 espèces d'oiseaux dont 215 espèces protégées (arrêté ministériel du 25/03/2015), parmi lesquelles 19 sont menacées d'après la Liste rouge des espèces menacées en Guyane (MNHN *et al.* 2018) : la prise en compte de ces espèces est une nécessité pour concilier développement d'énergies renouvelables (bois-énergie) et préservation de la biodiversité. L'avifaune est par ailleurs un maillon essentiel du fonctionnement de l'écosystème forestier, qui remplit des fonctions de pollinisation, de dispersion des graines, de régulation des insectes, de relations prédateurs-proies.

Face à cette pression, l'identification d'indicateurs permettant de mesurer les effets de l'exploitation forestière sur l'avifaune est cruciale pour définir les seuils d'une exploitation durable de la ressource forestière préservant la biodiversité. Le projet EIEFAG s'inscrivait dans une démarche de recherche de tels indicateurs. La mise en œuvre du protocole défini ici permettra d'identifier à terme les modes d'exploitation les moins impactants pour l'avifaune forestière, aidant ainsi au développement économique local prenant en compte la conservation de la biodiversité et des services écosystémiques dans les forêts guyanaises.

Cet objectif est conforme aux « *orientations régionales forestières de la Guyane* » (2005) et appuie la volonté d'une « exploitation à faible impact » affichée par l'ONF en Guyane. Il répond également aux objectifs 11 et 12 de la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (2011-2020) qui entend « *promouvoir un usage et une gestion durable des ressources, intégrant la biodiversité* » et qui stipule notamment que « *les effets cumulés des pressions [sur l'environnement] doivent également être suivis et pris en compte* ».

Certains oiseaux sont également utilisés par les communautés locales pour la subsistance (chasse) et pour les rites et traditions (confection de parures). Le maintien de la biodiversité dans les forêts exploitées servira par conséquent aussi à la préservation de la ressource de subsistance ainsi qu'à la sauvegarde de certaines traditions artistiques et culturelles pour les populations autochtones qui tirent profit de la biodiversité de la forêt guyanaise.

Bibliographie

- Aleixo, A. (1999). Effects of selective logging on a bird community in the Brazilian Atlantic forest. *The Condor* 101: 537-548.
- Anjos L. (2007). A eficiência do método de amostragem por pontos de escuta na avaliação da riqueza de aves. *Revista Brasileira de Ornitologia* 15: 239-243.
- Barlow, J., Peres, C. A., Henriques, L. M. P., Stouffer, P. C., & Wunderlee, J.M. (2006). The responses of understorey birds to forest fragmentation, logging and wildfires: an Amazonian synthesis. *Biological Conservation* 128: 182-192.
- Bregman, T. P., Sekercioglu, C. H. & Tobias, J. A. (2014). Global patterns and predictors of bird species responses to forest fragmentation: Implications for ecosystem function and conservation. *Biological Conservation* 16: 372–383.
- Burivalova, Z., Lee, T. M., Giam, X., Sekercioglu, Ç. H., Wilcove, D. S., Koh, L. P. (2015). Avian responses to selective logging shaped by species traits and logging practices. *Proc. R. Soc. B.* 282: 20150164. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.0164>.
- CHG (2019). *Liste des oiseaux de Guyane, version mars 2019*. Comité d'Homologation de Guyane, Cayenne. https://www.faune-guyane.fr/index.php?m_id=20158.
- Claessens, O. (2000). Effets de la fragmentation de l'habitat sur les peuplements d'oiseaux forestiers tropicaux. Le cas de la mise en eau du barrage de Petit Saut, Guyane française. Thèse de Doctorat, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris. 348 p.
- Claessens, O. (2015). Etat initial du peuplement d'oiseaux des parcelles du projet Bois-énergie, Saint-Georges. ONF / GEPOG, Cayenne. Rapport, 29 p.
- Claessens, O., Laurent, N & Conde, B. (2015). Un programme de suivi des oiseaux communs pour les départements d'Outre-Mer : adaptations du protocole STOC-EPS aux environnements tropicaux. *Alauda* 83 (4): 273-284.
- Claessens, O. & Ricardou, A. (2017). *Programme STOC-EPS Guyane, bilan 2012-2016*. Rapport non publié. GEPOG, Cayenne.
- de longh H.H. & van Weerd M. (2006). *The use of avian guilds for the monitoring of tropical forest disturbance by logging*. Tropenbos Documents 17. Wageningen, the Netherlands.
- Derlindati E. J. & Caziani S. M. (2005). Using canopy and understory mist nets and point counts to study bird assemblages in Chaco forests. *The Wilson Bulletin* 117: 92-99.
- Di Stefano, J. (2003). How much power is enough? Against the development of an arbitrary convention for statistical power calculations. *Functional Ecology* 17 (5) : 707-709.

- Dormoy, C. (2003). 45 indicateurs de développement durable : une contribution de l'Ifen. *Etudes et travaux* n°41. Institut Français de l'Environnement.
- Endler, J. A. & Théry, M. (1996). Interacting effects of lek placement, display behavior, ambient light and color patterns in three neotropical forest-dwelling birds. *The American Naturalist* 148: 421-452.
- GEPOG (2019). Faune-Guyane, plateforme participative rassemblant les données naturalistes en Guyane. www.faune-guyane.fr.
- Gray, M. A., Baldauf, S. L., Mayhew, P. J. & Hill, J. K. (2007). The response of avian feeding guilds to tropical forest disturbance. *Conserv. Biol.* 21, 133–141.
- Guitet, S., Brunaux, O., de Granville, J. J., Gonzales, S. & Richard-Hansen, C. (2015). *Catalogue des habitats forestiers de Guyane*. ONF / DEAL Guyane, Cayenne. 120 p.
- Herzog S. K., Kessler M. & Cahill T. M. (2002). Estimating species richness of tropical bird communities from rapid assessment data. *The Auk* 119: 749-769.
- Jiguet, F., Devictor, V., Julliard, R. & Couvet, D. (2011). French citizens monitoring ordinary birds provide tools for conservation and ecological sciences. *Acta Oecologica* 30 : 1-9.
- Jourde, P. & de Pracontal, N. (2012). *Volet de soutien technique pour la mise en œuvre du STOC en Guyane*. Présentation orale (Cayenne, 5/04/2012). Life+ CapDOM / GEPOG / MNHN / LPO.
- Julliard, R. & Jiguet, F. (2002). Un suivi intégré des populations d'oiseaux communs en France. *Alauda* 70 : 137-147.
- Mason, D. (1996). Responses of Venezuelan understory birds to selective logging, enrichment strips, and vine cutting. *Biotropica* 28 (3): 296-309.
- MNHN, UICN France & GEPOG (2018). La Liste rouge des espèces menacées en France – Chapitre Oiseaux de Guyane. Paris, France. Rapport d'évaluation.
- ONF (2007). Aménagement forestier, forêt de Régina - St Georges, 2007 - 2026. Document interne, 81 p.
- ONF – CIRAD (2007). Etude technico-économique sur les possibilités de la biomasse pour l'alimentation électrique de la Guyane. Rapport final Mai 2007. Programme régional pour la maîtrise de l'énergie. https://www.ecofog.gf/giec/doc_num.php?explnum_id=867.
- Peterman, R. M. (1990). Statistical power analysis can improve fisheries research and management. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 47: 2–15.
- Roopsind, A., Caughlin, T. T., Sambhu, H., Fragoso, J. M. V. & Putz, F. E. (2017). Logging and indigenous hunting impacts on persistence of large Neotropical animals. *Biotropica* 0(0):1-11.

- Stouffer P.C. & Bierregaard R.O. Jr. (1995). Use of Amazonian forest fragments by understory insectivorous birds. *Ecology* 76: 2429-2445.
- Taylor, B. L. & Gerrodette, T. (1993). The uses of statistical power in conservation biology – the Vaquita and Northern Spotted Owl. *Conservation Biology* 7: 489–500.
- Thiollay, J.-M. (1986). Structure comparée du peuplement avien dans trois sites de forêt primaire en Guyane. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)* 41 : 59-105.
- Thiollay, J.-M. (1992). Influence of selective logging on bird species diversity in a Guianan rain forest. *Conserv. Biol.* 6 : 47-63.
- Thiollay, J.-M. (1997). Disturbance, selective logging and bird diversity: a neotropical forest study. *Biodiversity and Conservation* 6: 1155-1173.
- Turner, I. M. & Corlett, R. T. (1996). The conservation value of small, isolated fragments of lowland tropical rain forest. *Trends in Ecology and Evolution* 11: 330-333.
- Vetter, D., Hansbauer, M. M., Végvári, Z. & Storch, I. (2011). Predictors of forest fragmentation sensitivity in Neotropical vertebrates: a quantitative review. *Ecography* 34: 1–8.



© O. Claessens

Sous-bois de bas-fond à palmiers toulouris.

ANNEXES

Tableau A1. Résultats des tests de puissance, selon le 1^{er} critère d'évaluation.

Proportion d'espèces affectées	Force d'effet (baisse prononcée)	Nombre de points par site	Nombre de passages	Effort total	Puissance (seuil 5%)	Puissance (seuil 10%)	Puissance (seuil 15%)	Puissance (seuil 20%)
10%	-10%	10	2	40	5%	9%	12%	16%
10%	-10%	10	4	80	12%	17%	20%	24%
10%	-10%	10	6	120	27%	32%	35%	38%
10%	-10%	10	8	160	29%	33%	37%	40%
10%	-10%	10	10	200	22%	27%	30%	35%
10%	-10%	10	12	240	17%	24%	29%	33%
10%	-10%	20	2	80	15%	19%	24%	27%
10%	-10%	20	4	160	27%	30%	34%	37%
10%	-10%	20	6	240	15%	20%	26%	31%
10%	-10%	20	8	320	13%	20%	27%	32%
10%	-10%	20	10	400	15%	21%	28%	34%
10%	-10%	20	12	480	14%	23%	30%	35%
10%	-10%	30	2	120	30%	34%	38%	40%
10%	-10%	30	4	240	14%	19%	25%	30%
10%	-10%	30	6	360	13%	21%	28%	33%
10%	-10%	30	8	480	17%	26%	33%	39%
10%	-10%	30	10	600	20%	26%	34%	42%
10%	-10%	30	12	720	22%	31%	39%	45%
10%	-10%	40	2	160	20%	26%	30%	33%
10%	-10%	40	4	320	12%	20%	26%	32%
10%	-10%	40	6	480	16%	22%	29%	35%

10%	-10%	40	8	640	21%	28%	36%	42%
10%	-10%	40	10	800	24%	30%	37%	45%
10%	-10%	40	12	960	29%	38%	45%	50%
10%	-20%	10	2	40	7%	13%	18%	22%
10%	-20%	10	4	80	20%	24%	30%	35%
10%	-20%	10	6	120	40%	42%	47%	51%
10%	-20%	10	8	160	43%	52%	56%	59%
10%	-20%	10	10	200	43%	49%	55%	60%
10%	-20%	10	12	240	40%	48%	55%	60%
10%	-20%	20	2	80	20%	26%	30%	34%
10%	-20%	20	4	160	44%	47%	51%	55%
10%	-20%	20	6	240	35%	44%	52%	57%
10%	-20%	20	8	320	36%	47%	56%	63%
10%	-20%	20	10	400	43%	55%	63%	68%
10%	-20%	20	12	480	51%	60%	68%	75%
10%	-20%	30	2	120	40%	46%	51%	54%
10%	-20%	30	4	240	34%	44%	53%	58%
10%	-20%	30	6	360	41%	55%	63%	69%
10%	-20%	30	8	480	49%	61%	68%	73%
10%	-20%	30	10	600	56%	68%	75%	81%
10%	-20%	30	12	720	63%	77%	82%	86%
10%	-20%	40	2	160	36%	45%	50%	54%
10%	-20%	40	4	320	35%	47%	55%	61%
10%	-20%	40	6	480	48%	63%	69%	75%
10%	-20%	40	8	640	58%	73%	79%	83%
10%	-20%	40	10	800	71%	80%	85%	89%
10%	-20%	40	12	960	75%	85%	89%	91%
10%	-30%	10	2	40	13%	19%	25%	32%
10%	-30%	10	4	80	25%	38%	45%	51%
10%	-30%	10	6	120	51%	57%	63%	67%

10%	-30%	10	8	160	61%	71%	76%	78%
10%	-30%	10	10	200	64%	77%	81%	85%
10%	-30%	10	12	240	66%	77%	82%	85%
10%	-30%	20	2	80	28%	39%	46%	52%
10%	-30%	20	4	160	62%	68%	74%	77%
10%	-30%	20	6	240	61%	73%	78%	82%
10%	-30%	20	8	320	71%	79%	84%	88%
10%	-30%	20	10	400	76%	86%	90%	92%
10%	-30%	20	12	480	85%	88%	92%	93%
10%	-30%	30	2	120	56%	61%	66%	70%
10%	-30%	30	4	240	59%	69%	75%	80%
10%	-30%	30	6	360	73%	81%	85%	89%
10%	-30%	30	8	480	82%	89%	92%	95%
10%	-30%	30	10	600	90%	94%	96%	97%
10%	-30%	30	12	720	94%	97%	98%	99%
10%	-30%	40	2	160	56%	68%	72%	77%
10%	-30%	40	4	320	67%	77%	82%	85%
10%	-30%	40	6	480	84%	90%	94%	96%
10%	-30%	40	8	640	91%	94%	96%	97%
10%	-30%	40	10	800	96%	99%	99%	99%
10%	-30%	40	12	960	98%	99%	99%	100%

Tableau A2. Résultats des tests de puissance, selon le 2^e critère d'évaluation.

Proportion d'espèces affectées par une baisse prononcée	Proportion d'espèces affectées par une baisse modérée	Force d'effet (baisse prononcée)	Force d'effet (baisse modérée)	Nombre de points par site	Nombre de passages	Effort total	Puissance (seuil 5%)	Puissance (seuil 10%)	Puissance (seuil 15%)	Puissance (seuil 20%)
7%	30%	-10%	-5%	10	2	40	5%	9%	13%	16%
7%	30%	-10%	-5%	10	4	80	7%	11%	17%	21%
7%	30%	-10%	-5%	10	6	120	34%	39%	42%	45%
7%	30%	-10%	-5%	10	8	160	21%	25%	30%	35%
7%	30%	-10%	-5%	10	10	200	11%	19%	24%	29%
7%	30%	-10%	-5%	10	12	240	10%	19%	25%	30%
7%	30%	-10%	-5%	20	2	80	10%	17%	21%	24%
7%	30%	-10%	-5%	20	4	160	13%	19%	24%	27%
7%	30%	-10%	-5%	20	6	240	9%	20%	26%	31%
7%	30%	-10%	-5%	20	8	320	14%	21%	27%	32%
7%	30%	-10%	-5%	20	10	400	17%	26%	34%	40%
7%	30%	-10%	-5%	20	12	480	18%	29%	35%	41%
7%	30%	-10%	-5%	30	2	120	28%	30%	34%	37%
7%	30%	-10%	-5%	30	4	240	13%	19%	26%	31%
7%	30%	-10%	-5%	30	6	360	15%	22%	29%	35%
7%	30%	-10%	-5%	30	8	480	17%	27%	34%	40%
7%	30%	-10%	-5%	30	10	600	19%	32%	38%	44%
7%	30%	-10%	-5%	30	12	720	24%	35%	45%	50%
7%	30%	-10%	-5%	40	2	160	11%	17%	23%	28%
7%	30%	-10%	-5%	40	4	320	14%	23%	29%	35%
7%	30%	-10%	-5%	40	6	480	17%	27%	33%	40%
7%	30%	-10%	-5%	40	8	640	23%	37%	43%	50%
7%	30%	-10%	-5%	40	10	800	29%	38%	47%	54%
7%	30%	-10%	-5%	40	12	960	33%	42%	50%	57%

7%	30%	-20%	-10%	10	2	40	9%	16%	20%	25%
7%	30%	-20%	-10%	10	4	80	14%	24%	29%	34%
7%	30%	-20%	-10%	10	6	120	44%	50%	56%	59%
7%	30%	-20%	-10%	10	8	160	37%	47%	53%	57%
7%	30%	-20%	-10%	10	10	200	30%	41%	49%	54%
7%	30%	-20%	-10%	10	12	240	33%	45%	53%	59%
7%	30%	-20%	-10%	20	2	80	17%	26%	31%	35%
7%	30%	-20%	-10%	20	4	160	27%	40%	46%	52%
7%	30%	-20%	-10%	20	6	240	34%	45%	54%	60%
7%	30%	-20%	-10%	20	8	320	40%	56%	63%	69%
7%	30%	-20%	-10%	20	10	400	50%	65%	70%	74%
7%	30%	-20%	-10%	20	12	480	57%	68%	75%	80%
7%	30%	-20%	-10%	30	2	120	40%	45%	49%	55%
7%	30%	-20%	-10%	30	4	240	36%	45%	52%	57%
7%	30%	-20%	-10%	30	6	360	46%	58%	65%	70%
7%	30%	-20%	-10%	30	8	480	57%	66%	75%	79%
7%	30%	-20%	-10%	30	10	600	67%	74%	81%	84%
7%	30%	-20%	-10%	30	12	720	75%	82%	84%	88%
7%	30%	-20%	-10%	40	2	160	25%	38%	44%	51%
7%	30%	-20%	-10%	40	4	320	43%	53%	61%	68%
7%	30%	-20%	-10%	40	6	480	58%	67%	73%	79%
7%	30%	-20%	-10%	40	8	640	69%	77%	83%	86%
7%	30%	-20%	-10%	40	10	800	77%	86%	91%	94%
7%	30%	-20%	-10%	40	12	960	85%	89%	93%	95%
7%	30%	-30%	-15%	10	2	40	14%	23%	30%	36%
7%	30%	-30%	-15%	10	4	80	25%	39%	45%	50%
7%	30%	-30%	-15%	10	6	120	58%	68%	73%	77%
7%	30%	-30%	-15%	10	8	160	60%	70%	75%	79%
7%	30%	-30%	-15%	10	10	200	59%	67%	74%	79%
7%	30%	-30%	-15%	10	12	240	67%	74%	81%	85%

7%	30%	-30%	-15%	20	2	80	28%	39%	46%	52%
7%	30%	-30%	-15%	20	4	160	55%	65%	72%	77%
7%	30%	-30%	-15%	20	6	240	63%	74%	80%	84%
7%	30%	-30%	-15%	20	8	320	74%	85%	90%	92%
7%	30%	-30%	-15%	20	10	400	82%	89%	93%	95%
7%	30%	-30%	-15%	20	12	480	88%	95%	96%	97%
7%	30%	-30%	-15%	30	2	120	58%	64%	69%	73%
7%	30%	-30%	-15%	30	4	240	65%	75%	81%	85%
7%	30%	-30%	-15%	30	6	360	79%	85%	89%	92%
7%	30%	-30%	-15%	30	8	480	89%	93%	94%	95%
7%	30%	-30%	-15%	30	10	600	93%	96%	98%	98%
7%	30%	-30%	-15%	30	12	720	96%	99%	100%	100%
7%	30%	-30%	-15%	40	2	160	51%	61%	70%	74%
7%	30%	-30%	-15%	40	4	320	75%	85%	88%	90%
7%	30%	-30%	-15%	40	6	480	89%	95%	97%	98%
7%	30%	-30%	-15%	40	8	640	96%	97%	98%	99%
7%	30%	-30%	-15%	40	10	800	98%	100%	100%	100%
7%	30%	-30%	-15%	40	12	960	99%	100%	100%	100%

Tableau A3. Résultats des tests de puissance, selon le 3^e critère d'évaluation.

Proportion d'espèces affectées	Force d'effet (augmentation)	Nombre de points par site	Nombre de passages	Effort total	Puissance (seuil 5%)	Puissance (seuil 10%)	Puissance (seuil 15%)	Puissance (seuil 20%)
7%	5%	10	2	40	4%	6%	8%	13%
7%	5%	10	4	80	12%	13%	16%	18%
7%	5%	10	6	120	19%	21%	23%	26%
7%	5%	10	8	160	18%	19%	22%	25%
7%	5%	10	10	200	14%	16%	20%	23%
7%	5%	10	12	240	11%	14%	18%	21%
7%	5%	20	2	80	14%	15%	18%	21%
7%	5%	20	4	160	16%	20%	22%	25%
7%	5%	20	6	240	8%	12%	15%	19%
7%	5%	20	8	320	6%	10%	13%	17%
7%	5%	20	10	400	6%	11%	14%	19%
7%	5%	20	12	480	6%	10%	14%	18%
7%	5%	30	2	120	20%	19%	22%	24%
7%	5%	30	4	240	7%	9%	12%	15%
7%	5%	30	6	360	6%	10%	14%	18%
7%	5%	30	8	480	6%	10%	15%	19%
7%	5%	30	10	600	5%	12%	16%	19%
7%	5%	30	12	720	7%	12%	16%	21%
7%	5%	40	2	160	13%	17%	20%	22%
7%	5%	40	4	320	8%	9%	12%	15%
7%	5%	40	6	480	7%	9%	14%	20%
7%	5%	40	8	640	6%	13%	18%	21%
7%	5%	40	10	800	7%	14%	19%	22%
7%	5%	40	12	960	6%	13%	18%	22%

7%	10%	10	2	40	5%	7%	10%	13%
7%	10%	10	4	80	15%	15%	19%	22%
7%	10%	10	6	120	23%	26%	28%	31%
7%	10%	10	8	160	25%	25%	28%	32%
7%	10%	10	10	200	16%	21%	26%	29%
7%	10%	10	12	240	15%	20%	24%	28%
7%	10%	20	2	80	17%	20%	23%	26%
7%	10%	20	4	160	18%	22%	26%	29%
7%	10%	20	6	240	12%	18%	22%	27%
7%	10%	20	8	320	10%	15%	19%	24%
7%	10%	20	10	400	12%	18%	24%	30%
7%	10%	20	12	480	11%	19%	26%	32%
7%	10%	30	2	120	21%	26%	29%	31%
7%	10%	30	4	240	11%	17%	22%	26%
7%	10%	30	6	360	9%	18%	24%	29%
7%	10%	30	8	480	11%	19%	25%	31%
7%	10%	30	10	600	13%	22%	29%	33%
7%	10%	30	12	720	17%	23%	28%	36%
7%	10%	40	2	160	18%	18%	22%	25%
7%	10%	40	4	320	8%	15%	19%	23%
7%	10%	40	6	480	12%	20%	27%	31%
7%	10%	40	8	640	14%	23%	28%	33%
7%	10%	40	10	800	15%	24%	30%	36%
7%	10%	40	12	960	19%	27%	33%	38%
7%	20%	10	2	40	7%	11%	16%	21%
7%	20%	10	4	80	20%	27%	30%	36%
7%	20%	10	6	120	29%	36%	40%	43%
7%	20%	10	8	160	28%	35%	39%	44%
7%	20%	10	10	200	26%	34%	39%	45%
7%	20%	10	12	240	24%	32%	38%	43%

7%	20%	20	2	80	25%	28%	32%	36%
7%	20%	20	4	160	25%	31%	37%	42%
7%	20%	20	6	240	21%	33%	40%	45%
7%	20%	20	8	320	24%	35%	42%	47%
7%	20%	20	10	400	25%	39%	47%	53%
7%	20%	20	12	480	33%	42%	50%	56%
7%	20%	30	2	120	30%	34%	38%	42%
7%	20%	30	4	240	20%	30%	38%	42%
7%	20%	30	6	360	23%	36%	44%	51%
7%	20%	30	8	480	30%	41%	49%	54%
7%	20%	30	10	600	37%	52%	60%	65%
7%	20%	30	12	720	43%	59%	65%	70%
7%	20%	40	2	160	23%	29%	35%	40%
7%	20%	40	4	320	23%	34%	41%	46%
7%	20%	40	6	480	32%	44%	51%	57%
7%	20%	40	8	640	40%	51%	58%	65%
7%	20%	40	10	800	50%	56%	64%	70%
7%	20%	40	12	960	55%	62%	68%	73%

Tableau A4. Résultats des tests de puissance, selon le 3^e critère d'évaluation (AM), pour des stratégies d'effort très élevées

Proportion d'espèces affectées	Force d'effet (augmentation)	Nombre de points par site	Nombre de passages	Effort total	Puissance (seuil 10%)	Puissance (seuil 15%)	Puissance (seuil 20%)
7%	5%	10	2	40	6%	8%	13%
7%	5%	10	4	80	13%	16%	18%
7%	5%	10	6	120	21%	23%	26%
7%	5%	10	8	160	19%	22%	25%
7%	5%	10	10	200	16%	20%	23%
7%	5%	10	12	240	14%	18%	21%
7%	5%	20	2	80	15%	18%	21%
7%	5%	20	4	160	20%	22%	25%
7%	5%	20	6	240	12%	15%	19%
7%	5%	20	8	320	10%	13%	17%
7%	5%	20	10	400	11%	14%	19%
7%	5%	20	12	480	10%	14%	18%
7%	5%	30	2	120	19%	22%	24%
7%	5%	30	4	240	9%	12%	15%
7%	5%	30	6	360	10%	14%	18%
7%	5%	30	8	480	10%	15%	19%
7%	5%	30	10	600	12%	16%	19%
7%	5%	30	12	720	12%	16%	21%
7%	5%	40	2	160	17%	20%	22%
7%	5%	40	4	320	9%	12%	15%
7%	5%	40	6	480	9%	14%	20%
7%	5%	40	8	640	13%	18%	21%
7%	5%	40	10	800	14%	19%	22%
7%	5%	40	10	800	13%	17%	21%

7%	5%	40	12	960	13%	18%	22%
7%	5%	40	15	1200	15%	21%	26%
7%	5%	40	20	1600	17%	22%	27%
7%	5%	40	25	2000	20%	27%	31%
7%	5%	40	30	2400	22%	27%	33%
7%	5%	40	35	2800	22%	28%	35%
7%	5%	40	40	3200	25%	33%	38%
7%	5%	40	45	3600	27%	34%	40%
7%	5%	40	50	4000	28%	36%	41%
7%	5%	40	55	4400	31%	39%	45%
7%	5%	40	60	4800	35%	43%	49%
7%	10%	10	2	40	7%	10%	13%
7%	10%	10	4	80	15%	19%	22%
7%	10%	10	6	120	26%	28%	31%
7%	10%	10	8	160	25%	28%	32%
7%	10%	10	10	200	21%	26%	29%
7%	10%	10	12	240	20%	24%	28%
7%	10%	20	2	80	20%	23%	26%
7%	10%	20	4	160	22%	26%	29%
7%	10%	20	6	240	18%	22%	27%
7%	10%	20	8	320	15%	19%	24%
7%	10%	20	10	400	18%	24%	30%
7%	10%	20	12	480	19%	26%	32%
7%	10%	30	2	120	26%	29%	31%
7%	10%	30	4	240	17%	22%	26%
7%	10%	30	6	360	18%	24%	29%
7%	10%	30	8	480	19%	25%	31%
7%	10%	30	10	600	22%	29%	33%
7%	10%	30	12	720	23%	28%	36%
7%	10%	40	2	160	18%	22%	25%

7%	10%	40	4	320	15%	19%	23%
7%	10%	40	6	480	20%	27%	31%
7%	10%	40	8	640	23%	28%	33%
7%	10%	40	10	800	24%	30%	36%
7%	10%	40	10	800	26%	33%	38%
7%	10%	40	12	960	27%	33%	38%
7%	10%	40	15	1200	32%	39%	46%
7%	10%	40	20	1600	39%	47%	53%
7%	10%	40	25	2000	47%	56%	62%
7%	10%	40	30	2400	50%	57%	64%
7%	10%	40	35	2800	56%	64%	69%
7%	10%	40	40	3200	61%	69%	74%
7%	10%	40	45	3600	63%	70%	75%
7%	10%	40	50	4000	67%	74%	79%
7%	10%	40	55	4400	71%	78%	83%
7%	10%	40	60	4800	76%	82%	85%
7%	15%	10	2	40	8%	12%	16%
7%	15%	10	4	80	22%	26%	30%
7%	15%	10	6	120	31%	34%	37%
7%	15%	10	8	160	31%	34%	38%
7%	15%	10	10	200	25%	31%	35%
7%	15%	10	12	240	24%	30%	35%
7%	15%	20	2	80	22%	25%	29%
7%	15%	20	4	160	29%	33%	36%
7%	15%	20	6	240	22%	28%	33%
7%	15%	20	8	320	24%	30%	36%
7%	15%	20	10	400	26%	34%	39%
7%	15%	20	12	480	31%	38%	44%
7%	15%	30	2	120	30%	33%	36%
7%	15%	30	4	240	19%	26%	30%

7%	15%	30	6	360	25%	32%	39%
7%	15%	30	8	480	30%	38%	44%
7%	15%	30	10	600	33%	41%	49%
7%	15%	30	12	720	36%	44%	51%
7%	15%	40	2	160	24%	29%	33%
7%	15%	40	4	320	23%	29%	34%
7%	15%	40	6	480	29%	37%	43%
7%	15%	40	8	640	34%	44%	49%
7%	15%	40	10	800	41%	48%	55%
7%	15%	40	10	800	41%	49%	55%
7%	15%	40	12	960	45%	53%	60%
7%	15%	40	15	1200	54%	61%	66%
7%	15%	40	20	1600	64%	70%	76%
7%	15%	40	25	2000	72%	77%	80%
7%	15%	40	30	2400	79%	84%	87%
7%	15%	40	35	2800	81%	85%	89%
7%	15%	40	40	3200	87%	91%	92%
7%	15%	40	45	3600	90%	93%	94%
7%	15%	40	50	4000	91%	94%	96%
7%	15%	40	55	4400	94%	96%	97%
7%	15%	40	60	4800	96%	97%	98%
7%	20%	10	2	40	11%	16%	21%
7%	20%	10	4	80	27%	30%	36%
7%	20%	10	6	120	36%	40%	43%
7%	20%	10	8	160	35%	39%	44%
7%	20%	10	10	200	34%	39%	45%
7%	20%	10	12	240	32%	38%	43%
7%	20%	20	2	80	28%	32%	36%
7%	20%	20	4	160	31%	37%	42%
7%	20%	20	6	240	33%	40%	45%

7%	20%	20	8	320	35%	42%	47%
7%	20%	20	10	400	39%	47%	53%
7%	20%	20	12	480	42%	50%	56%
7%	20%	30	2	120	34%	38%	42%
7%	20%	30	4	240	30%	38%	42%
7%	20%	30	6	360	36%	44%	51%
7%	20%	30	8	480	41%	49%	54%
7%	20%	30	10	600	52%	60%	65%
7%	20%	30	12	720	59%	65%	70%
7%	20%	40	2	160	29%	35%	40%
7%	20%	40	4	320	34%	41%	46%
7%	20%	40	6	480	44%	51%	57%
7%	20%	40	8	640	51%	58%	65%
7%	20%	40	10	800	56%	64%	70%
7%	20%	40	10	800	58%	65%	71%
7%	20%	40	12	960	62%	68%	73%
7%	20%	40	15	1200	71%	78%	82%
7%	20%	40	20	1600	82%	87%	90%
7%	20%	40	25	2000	87%	91%	93%
7%	20%	40	30	2400	92%	95%	97%
7%	20%	40	35	2800	95%	97%	98%
7%	20%	40	40	3200	97%	98%	98%
7%	20%	40	45	3600	97%	98%	99%
7%	20%	40	50	4000	98%	99%	100%
7%	20%	40	55	4400	100%	100%	100%
7%	20%	40	60	4800	99%	99%	100%
