



PROJET SCIENCES PARTICIPATIVES



Perdrix rousse-gorge © Yabalex

RAPPORT D'ETUDE

Rédacteurs : Lucie Gauchet¹, Jane Cozette¹, Damien Chiron², Pierrick Ferret²

1 : Fédération Départementale des Chasseurs de La Réunion

2 : Société d'Etudes Ornithologiques de La Réunion

Bénévoles : Jean Pierrot Abar, Damien Rangama, Stéphane Lejeune, Daniel Clain, Loïc Payet, Olivia Baleya, Nicolas Savignan, George Marie Boucher, Alexandre Thomas, Martial Brulez et Jean Pierre Etheve



TABLE DES MATIERES

Table des matières	1
Liste des tableaux	2
Liste des figures	3
Liste des annexes	4
1 Contexte	1
2 Matériel et méthodes	2
2.1 Echantillonnage	2
2.1.1 Espèces cibles	2
2.1.2 Sites d'étude	3
2.1.3 Déroulement d'un point d'écoute.....	6
2.1.4 Relevés de terrain.....	7
2.2 Analyse des données	7
2.2.1 Modèles de Huggins	8
2.2.2 Modèles de Royles.....	11
2.2.3 Logiciels	13
3 Résultats	13
3.1 Généralités	13
3.2 Caille des blés	14
3.2.1 Exploration des données	14
3.2.2 Modèles de Huggins	15
3.2.3 Modèles de Royle	18
3.3 Caille peinte	21
3.3.1 Exploration des données	21
3.3.2 Modèles de Huggins	21
4 Discussion	22
4.1 Résultats	22
4.2 Comparaison avec les résultats des IKA	24
4.3 Conclusion et perspectives.....	25
5 Références	26

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier chaleureusement la Société d'Études Ornithologiques de La Réunion (SEOR) et plus particulièrement Damien Chiron et Pierrick Ferret, pour le partenariat que nous avons mené tout au long de cette étude. Ils nous ont largement aidés dans la définition des objectifs de notre étude, dans sa conception et dans la réalisation. Nous les remercions également pour la relecture de ce rapport.

Nous remercions également la Direction Régionale de l'Environnement, de l'aménagement et du logement, qui a financé cette étude.

Enfin, nous remercions également très chaleureusement les onze bénévoles qui ont participé aux comptages : Jean Pierrot Abar, Damien Rangama, Stéphane Lejeune, Daniel Clain, Loïc Payet, Olivia Baleya, Nicolas Savignan, George Marie Boucher, Alexandre Thomas, Martial Brulez et Jean Pierre Etheve

RESUME

L'île de La Réunion regroupe dix espèces de gibiers à plumes, dont l'écologie et la biologie sont peu connues. La Fédération Départementale des Chasseurs de La Réunion a donc décidé de mettre en place une étude sur certaines de ces espèces (Caille rouge, Caille des blés, Caille peinte de chine, Faisan) afin de déterminer leurs densités de population et leur abondance à La Réunion. Cette étude a été réalisée à l'aide de onze chasseurs bénévoles, qui ont été formés et qui ont effectué les comptages, permettant à ce projet de s'ancrer dans les sciences participatives. Nous avons également travaillé en collaboration avec la Société d'Etudes Ornithologiques de La Réunion (SEOR) et son programme d'étude sur « l'Avifaune Terrestre Nicheuse de la Réunion » (FEDER ATeN RUN). Le rôle de la SEOR était de réaliser des comptages mensuels sur douze itinéraires répartis dans tous les milieux naturels de l'île. Le rôle des bénévoles était de réaliser des comptages ponctuels sur ces itinéraires, appelés points d'écoute, avec utilisation de la repasse (diffusion des vocalisations de l'espèce pour provoquer une réponse comportementale et augmenter le nombre d'observations). L'analyse des données a été effectuée de manière à prendre compte la probabilité de détection incertaine des individus, c'est-à-dire la probabilité qu'un individu soit présent mais qu'il ne chante pas lors de l'écoute. Au total, 44 points d'écoute ont été échantillonnés trois fois par les bénévoles au mois d'octobre 2021, pour un total de plus de 24 heures d'écoute. Nous avons obtenu 95 contacts, majoritairement sur les Cailles des blés et les Cailles peintes. L'analyse des données a montré que la Caille des blés avait une probabilité de détection d'environ 75 % au lever du soleil et que cette dernière diminuait à mesure qu'on s'en éloignait. La densité estimée était de $10,3 \pm 13,3$ individus mâles / km², soit plus de 9000 individus à La Réunion. La Caille peinte avait quant à elle une probabilité de détection stable, d'environ 14 %, et la densité estimée était de $7,1 \pm 1,7$ individus chanteurs / km², soit près de 2000 individus. Les résultats n'ont pas pu être analysés pour les Cailles rouges et les Faisans, pour lesquels nous n'avons pas obtenu assez de contacts. Nous souhaitons relancer l'étude en 2022 / 2023 sur les itinéraires où la présence des quatre espèces est avérée et sur de nouveaux itinéraires. Cela permettrait la détermination des probabilités de détection pour les deux espèces manquantes, et la mise en place des modèles plus complexes prenant en compte les surface des milieux naturels.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse de l'étude préliminaire du taux de réponse à la repasse de sept espèces de Phasianidés et Turnicidés nicheuses à La Réunion.....	3
Tableau 2 : Détail des douze itinéraires échantillonnés.....	5
Tableau 3 : Ensemble des modèles de Huggins testés pour la Caille des blés et la Caille peinte.....	10
Tableau 4 : Ensemble des huit modèles de Royle testés pour la Caille des blés. L.....	12
Tableau 5 : Nombre d'observations individuelles pour chaque itinéraire et chaque espèce, les trois passages confondus.....	13
Tableau 6 : Nombre de détections auditives par point d'écoute et par passage.....	14
Tableau 7 : Résultats des onze modèles de Huggins testés pour la Caille des blés.....	16
Tableau 8 : Résultats des huit modèles de Royle testés pour la Caille des blés. AICc = critère d'information d'Akaike ; $\Delta AICc$ = différence d'AICc avec le plus faible AICc.....	18
Tableau 9 : Résultats des dix meilleurs modèles sélectionnés par le critère d'Akaike pour la Caille peinte....	21
Tableau 10 : Résumé des modèles sélectionnés pour la Caille des blés et pour la Caille peinte.....	23
Tableau 11 : Nombre de contacts enregistrés pour chacune des 4 espèces recherchées selon la nature du protocole, la durée de prospection associée et l'itinéraire (Chiron et Ferret, 2022).....	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des douze itinéraires et des 44 points d'écoute échantillonnés à l'échelle de l'île de La Réunion.....	4
Figure 2 : Surface des différents milieux naturels représentés, tous points d'écoute confondus.....	5
Figure 3 : Pourcentage des différents milieux naturels représentés sur les points d'écoute en fonction de l'itinéraire.....	6
Figure 4 : Construction temporelle d'un point d'écoute avec ses phases de repasse et d'écoute.....	6
Figure 5 : Probabilités des histoires de détection pour trois occasions de capture.....	8
Figure 6 : Comparaison de la distribution des surfaces des milieux naturels représentés sur les points d'écoute où la présence de la Caille des blés est avérée de ceux représentés sur les points où elle n'a jamais été détectée.....	15
Figure 7 : Représentation graphique du modèle de Huggins M_{heure} représentant la probabilité de détection de la Caille des blés en fonction de l'heure de l'écoute. Les valeurs prédites sont représentées avec la ligne continues et les intervalles de confiance à 95% sont représentés en pointillés.....	16
Figure 8 : Représentation graphique du modèle de Huggins $M_{\text{heure+visite}}$ représentant la probabilité de détection de la Caille des blés en fonction de l'heure de l'écoute et du numéro de la mini-session.....	17
Figure 9 : Représentation graphique du modèle de Royle $M_{\sim\text{heure}}$ représentant la probabilité de détection sur les points d'écoute en fonction de l'heure du relevé chez la Caille des blés.....	19

Figure 10 : Représentation graphique du modèle de Royle $M_{\sim\text{cultures}}$ représentant l'abondance sur les points d'écoute en fonction de la surface en culture intensive (cannes) pour la Caille des blés. 20

Figure 11 : Représentation graphique du modèle de Royle M_{culture} représentant la probabilité de détection en fonction de la surface en culture intensive (cannes) pour la Caille des blés. 20

Figure 12 : Représentation graphique du modèle de Huggins M_{heure} représentant la probabilité de détection de la Caille peinte en fonction de l'heure de l'écoute. 22

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Étude préliminaire du taux de réponse à la repasse de sept espèces de Phasianidés et Turnicidés nicheuses à La Réunion

Annexe 2 : Support de formation pour les bénévoles : contexte, espèces cibles, itinéraires, protocole et matériel

1 CONTEXTE

L'île de La Réunion regroupe dix espèces de gibiers à plumes (Barré et al. 1996) :

- Six espèces de Phasianidés (Galliformes) : le Faisan de Colchide (*Fasianus colchidus*), la Perdrix de Madagascar (*Margaroperdrix madagascariensis*), la Caille des blés (*Coturnix coturnix africana*), la Caille peinte (*Excalfactoria chinensis*), la Perdicule rousse-gorge (*Perdicula asiatica*) et le Francolin gris (*Francolinus pondicerianus*), pour lequel des arrêtés préfectoraux fixent le nombre de prélèvements à zéro ;
- Une espèce de Turnicidés (Charadriiformes), le Turnix de Madagascar (*Turnix nigricolis*) ;
- Une espèce de Colombidés (Columbiformes), la Géopélie striée (*Geopelia striata*) ;
- Une espèce de Pycnonotidés (Passeriformes), le Bulbul orphée (*Pycnonotus jocosus*) ;
- Et une espèce de Plocéidés (Passeriformes), le Tisserin gendarme (*Ploceus cuculatus*).

Très peu d'études ont été effectuées sur ces différentes espèces et il existe donc un véritable manque de connaissances concernant leur écologie et leur biologie. Or il est indispensable pour la gestion de ces espèces (périodes de chasse, prélèvements annuels, zones de chasse) de mieux les connaître. La seule étude scientifique mise en place à La Réunion sur ces espèces a été effectuée en 2001-2002 par la Société d'Etudes Ornithologiques de La Réunion (SEOR) (Salamolard & Couzi, 2002). Elle a permis d'étudier la distribution, la biologie de reproduction, et d'établir la densité relative de ces dix espèces. Le protocole consistait réaliser des comptages le long de onze itinéraires répartis sur l'ensemble du territoire de La Réunion et couvrant des milieux naturels et des altitudes différents, afin d'en extraire des Indices Kilométriques d'Abondance (IKA).

En 2020 et 2021, la SEOR a mis en place un programme d'étude sur « l'Avifaune Terrestre Nicheuse de la Réunion » (FEDER ATeN RUN). Un de ses objectifs était d'estimer la taille de population de ces dix espèces. Pour cela, l'association a reconduit, sur les mêmes itinéraires (ainsi que sur un itinéraire additionnel), un protocole similaire à celui de 2001-2022. L'analyse de données devait se faire avec la méthode du *distance sampling* afin d'obtenir les densités absolues. Cependant, un nombre trop faible d'observations a été collecté, rendant impossible la mise en place ces analyses. Un partenariat entre la SEOR et la Fédération Départementale des Chasseurs de La Réunion (FDC974) a donc été établi pour combler ces lacunes.

Le Projet Sciences Participatives (PSP), porté par la FDC974, s'intégrait dans cette dynamique et se voulait donc complémentaire à l'étude de la SEOR. Il consistait en la mise en place, sur les douze itinéraires parcourus par la SEOR, de points d'écoute avec repasse combinés à des analyses de données pour populations fermées. L'objectif est d'obtenir des probabilités de détection pour chaque espèce, ainsi que des estimations de densités absolues et l'abondance à La Réunion. L'étude porte sur quatre espèces de Phasianidés : la Caille des blés, la Caille peinte, la Perdicule rousse-gorge, et le Faisan de Colchide.

Ce projet a également pour vocation d'initier une dynamique au sein des adhérents de la Fédération. Des chasseurs bénévoles seront responsables du terrain à effectuer. Cela leur permettra de s'impliquer dans la résolution des questions que la communauté cynégétique de La Réunion se pose. Une fois formés aux protocoles scientifiques et à l'utilisation de divers outils, ces chasseurs pourront devenir une force capable d'épauler la FDC974 dans ses futurs projets d'étude.

2 MATERIEL ET METHODES

Le protocole était basé sur des points d'écoute, répartis le long des douze itinéraires échantillonnés par la SEOR selon le protocole des IKA (Chiron & Ferret, 2022). Onze itinéraires étaient les mêmes que ceux mis en place en 2002 (Salamolard & Couzi 2002) et un dernier a été ajouté. Les observateurs ont donc été placés sur différents points pour une durée bien définie et ont dû identifier tous les contacts observés pour les quatre espèces cibles, qu'ils soient visuels ou auditifs.

Le chant des espèces cibles a été diffusé lors de l'écoute, de façon à provoquer une réponse comportementale des individus : c'est la repasse. Cette pratique est recommandée dans le cas d'espèces rares, difficiles à détecter ou occupant des territoires étendus (Marion et al. 1981), ce qui est le cas pour les espèces de Phasianidés présentes sur le territoire. Elle tire souvent parti du comportement reproducteur observé chez les mâles de la plupart des espèces d'oiseaux. En effet, le mâle chante pour attirer la femelle mais également pour défendre un territoire vis-à-vis des autres reproducteurs alors considérés comme des concurrents. Notons que cette technique n'est à utiliser que dans le cas d'études scientifiques spécifiques, et en aucun cas pour des actions de chasse. Elle engendre en effet un coût énergétique supplémentaire pour les oiseaux.

Des simples comptages comme les IKA ne permettent pas d'estimer les densités absolues des espèces (Besnard & Salles 2010). En effet, ils ne prennent pas en compte les probabilités de détection : la part d'individus présents mais non comptabilisés est inconnue. Les données ont donc été analysées avec des méthodes d'estimation de densité pour populations fermées, permettant l'estimation de ces probabilités de détection et donc des densités absolues. Ces méthodes consistent à effectuer un ensemble de relevés sur une période courte pour laquelle l'hypothèse d'une population fermée est validée (pas d'émigration et d'immigration sur cette période). L'objectif de l'utilisation de la repasse était d'obtenir suffisamment de contacts avec les espèces cibles pour pouvoir estimer ces probabilités de détection.

2.1 ECHANTILLONNAGE

2.1.1 Espèces cibles

Une pré-étude a été réalisée afin de déterminer quelles sont les espèces de Phasianidés et Turnicidés qui répondent à la repasse, et leur distance de détection (voir annexe 1 et tableau 1 ci-contre). Trois espèces répondent bien à la repasse (Francolin gris, Faisan de Colchide, Perdricule rousse-gorge), avec un taux de réponse supérieur à 40 %. Deux espèces n'ont pas pu être testées mais semblent bien répondre du fait de leur comportement vocal actif (Francolin gris, Safford & Hawkins 2013) et/ou d'études durant lesquelles la repasse a été utilisée (Caille des blés, Mur 1994; Tesson & Boutin n.d.) ; Caille peinte, Adkins-Regan 2016). Enfin, deux espèces semblent peu, voire pas du tout répondre à la repasse : la Perdrix de Madagascar, qui est une espèce assez silencieuse et qui n'a pas de chant territorial (Safford & Hawkins 2013) ; et le Turnix de Madagascar, qui émet bien un chant, mais qui est très grave (Safford & Hawkins 2013), et qui ne semble donc audible que sur de très courtes distances.

Pour cette étude, basée sur la repasse, nous avons donc choisi de ne travailler que sur quatre espèces : le Faisan de Colchide et la Perdricule rousse-gorge, qui répondent bien à la repasse, la Caille des blés et la Caille peinte, qui devraient également bien répondre. Le Francolin gris n'a pas été retenu car il fait l'objet d'une étude spécifique et n'est pas présent sur les douze itinéraires étudiés. Nous avons éliminé le Turnix de

Madagascar et la Perdrix de Madagascar en raison de l'absence de réponse à la repasse observée dans notre pré-étude.

Tableau 1 : Synthèse de l'étude préliminaire du taux de réponse à la repasse de sept espèces de Phasianidés et Turnicidés nicheuses à La Réunion. Taux de réponse = manifestation comportementale visuelle ou auditive survenue suite aux à l'émission de la repasse.

	Type de vocalisation utilisée	Individus cibles	Réponse à la repasse	Taux de réponse	Distance de détection (m)
Francolin gris	Chant territorial	Mâles	Oui : vocalisation, déplacement	59 %	> 500
Faisan de Colchide	Cri territorial (mâles)	Mâles	Oui : vocalisation, déplacement	50 %	> 400
Perdicule rousse-gorge	Chant des mâles	Mâles	Oui : vocalisation	41 %	> 300
Caille des blés	Cris des femelles	Mâles	Oui : vocalisations, déplacement (Mur, 1994)	?	300 (Mur, 1994)
Caille peinte	Chant mixte	?	Pas de test	?	> 10
Turnix de Madagascar	Chant des femelles	?	Non	0 %	?
Perdrix de Madagascar	Cris des deux sexes	?	Non	0 %	> 100

2.1.2 Sites d'étude

Douze itinéraires ont été sélectionnés par la SEOR (figure 1 et tableau 2 ci-après), ayant une longueur de 2,9 km à 9,5 km. Ils échantillonnent des altitudes allant de 10 à 2400 m et les dix grands types de milieux naturels de La Réunion selon la cartographie du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD, 2018) (Chiron & Ferret, 2022) :

- Surface bâtie ;
- Cultures intensives (cannes à sucre essentiellement) ;
- Surface en eau et marais ;
- Forêt primaire / majoritairement indigène ;
- Plantation forestière ;
- Prairies ;
- Savane herbacée et patch de vigne maronne ;
- Végétation arbustive à arborée ;
- Végétation rase ;
- Verger et maraichage.

La proportion des sur les itinéraires est proportionnelle à celle sur l'île de La Réunion (Chiron & Ferret, 2022).

Légende

- Point d'écoute
- Itinéraire

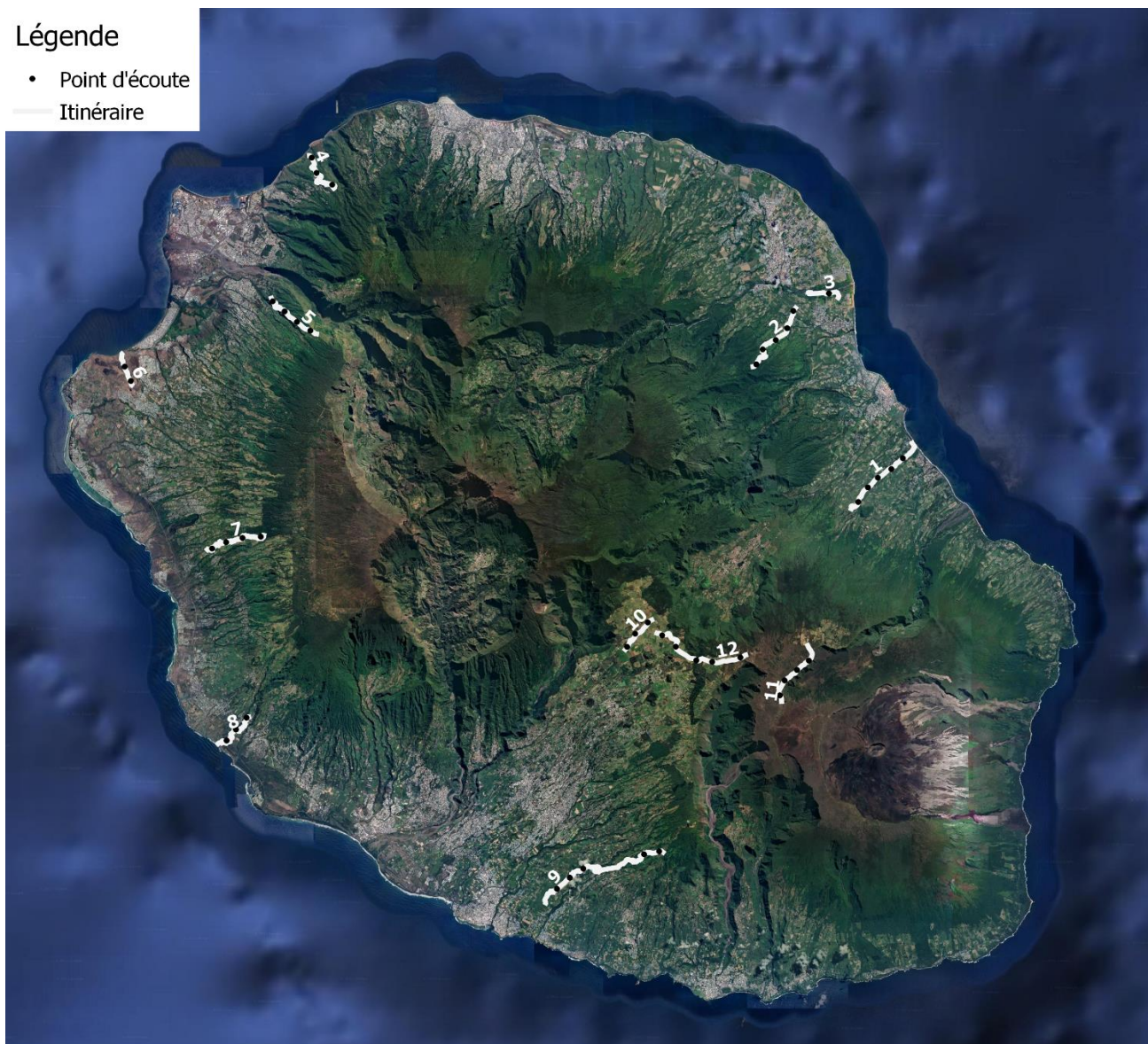


Figure 1 : Localisation des douze itinéraires et des 44 points d'écoute échantillonnés à l'échelle de l'île de La Réunion.

Tableau 2 : Détail des douze itinéraires échantillonnés.

N°	ITINERAIRES	ZONE	LOCALITE	ALTITUDE	Nombre de points d'écoute
1	Chemin Ste Marguerite	Est	Sainte-Anne	15 m – 430 m	5
2	Sentier de Bras Valentin	Est	Bras-Panon	83 m – 440 m	5
3	Estuaire de la Rivière du Mât	Est	Bras-Panon	10 m – 135 m	1
4	Sentier de la Grande Chaloupe	Nord	La Possession	210 m – 590 m	3
5	Chemin de Sans Souci	Ouest	La Plaine Saint-Paul	500 m – 1250 m	4
6	Chemin Summer du Cap Lahoussaye	Ouest	Saint-Gilles les Hauts	20 m – 260 m	2
7	Route forestière de Piton Rouge	Ouest	Trois Bassins	822 m – 1390 m	4
8	Sentier de Bois Blanc	Ouest	Les Avirons	10 m – 400 m	3
9	Chemin de Mont-Vert les Hauts	Sud	Mont-Vert	244 m – 1134 m	5
10	Coteau de Brèdes	Hauts	Plaine des Cafres	1562 m – 1595 m	3
11	Sentier de Piton de l'Eau	Hauts	Plaine des Cafres	2000 m – 2370 m	4
12	Sentier Josemont Lauret	Hauts	Plaine des Cafres	1606 m – 2160 m	5
TOTAL					44

Entre deux et cinq points d'écoute de 500 mètres de rayon ont été mis en place sur chaque itinéraire en fonction de la longueur du transect. Le choix de la longueur du rayon se base sur la distance jugée maximale pour détecter les espèces cibles aux jumelles et sur la distance supposée jusqu'à laquelle il est jugée possible d'entendre le chant le plus puissant des espèces étudiées, à savoir celui du Faisan de Colchide. Les points étaient donc espacés d'au moins un kilomètre afin d'éviter les doubles comptages.

Les dix milieux naturels cités plus haut étaient représentés sur les points d'écoute (figure 2). Leurs pourcentages sont représentatifs de ceux présents sur les 12 itinéraires et sur la totalité de l'île de La Réunion. Cependant, certains itinéraires présentaient des points d'écoute sur lesquels certains milieux naturels étaient plus représentés que d'autres (figure 3).

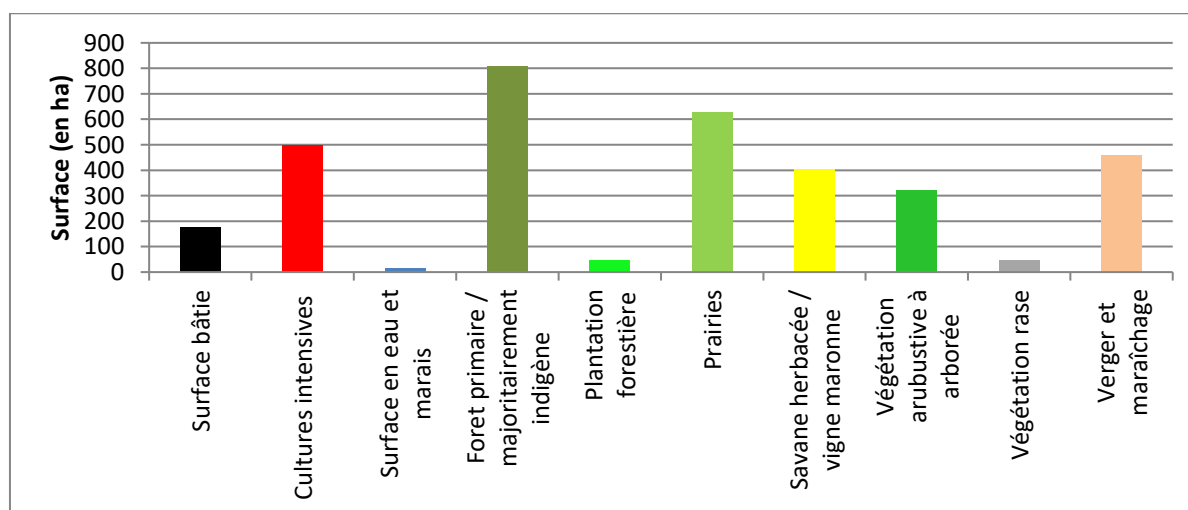


Figure 2 : Surface des différents milieux naturels représentés, tous points d'écoute confondus.

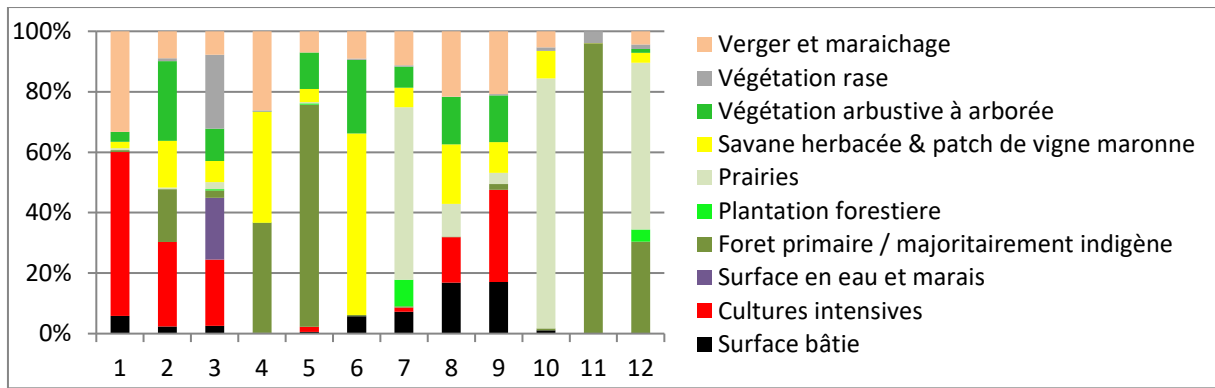


Figure 3 : Pourcentage des différents milieux naturels représentés sur les points d'écoute en fonction de l'itinéraire.

2.1.3 Déroulement d'un point d'écoute

Les écoutes étaient de 11 minutes par point. Chaque point d'écoute était en fait composé de quatre mini sessions d'écoute. La première est une session de deux minutes correspondant à la phase d'écoute passive. Les sessions 2, 3 et 4 correspondent à des sessions de trois minutes comprenant à la fois une phase de repasse (1 minute) et d'écoute consécutive (2 minutes) à cette dernière (figure 4 ci-dessous).

Temps (min)	0 – 2	2 – 3				3 – 5	5 – 6				6 – 8	8 – 9				9 – 11
Mini-session	1	2				3	3				4	4				5
Phase	Écoute passive	repassé				1 ^{ère} écoute	repassé				2 ^{ème} écoute	repassé				3 ^{ème} écoute
		CB (15 sec.)	CP (15 sec.)	FC (15 sec.)	PRG (15 sec.)		CB (15 sec.)	CP (15 sec.)	FC (15 sec.)	PRG (15 sec.)		CB (15 sec.)	CP (15 sec.)	FC (15 sec.)	PRG (15 sec.)	
Durée (min)	2	1				2	1				2	1				2

Figure 4 : Construction temporelle d'un point d'écoute avec ses phases de repasse et d'écoute. CB = Caille des blés ; CP = Caille peinte ; FC = Faisan de Colchide ; PRG = Perdricule rousse-gorge.

L'émission de la repasse (60 secondes) était composée de 15 secondes de vocalisations de chacune des espèces assemblées les unes à la suite des autres (figure 4). Différents types de vocalisations ont été utilisés, du chant territorial du mâle jusqu'au cri de la femelle, mais toujours dans le but de faire réagir les mâles :

- Caille des blés : cri de femelles - son de criquet (Tesson & Boutin n.d.)
- Caille peinte : chant des deux sexes - sifflement puissant d'une à trois syllabes (Adkins-Regan 2016)
- Faisan de Colchide : chant des mâles - deux syllabes (Nowak-Boyd 2014)
- Perdricule rousse-gorge : chant des mâles : trille rapide et puissante (Safford & Hawkins 2013)

La repasse a été diffusée à l'aide d'enceintes HOMDAY XPERT connectées à des clés USB contenant une piste de onze minutes correspondant à la totalité du point d'écoute (puissance nominale : 2 x 20W bi-amp ; réponse en fréquence : 70-20 kHz ; rapport signal/bruit : 80 dB ; puissance : 19V 3A). Le début et la fin des onze minutes étaient matérialisés par un BIP prolongé.

2.1.4 Relevés de terrain

Les points d'écoute ont été réalisés par onze bénévoles recrutés par la FDC974. Chaque point d'écoute a été échantillonné trois fois entre le 10 octobre et le 30 novembre 2021 (exception pour l'itinéraire 4 qui a été échantillonné en janvier 2022). Cette période est propice à l'utilisation de la repasse puisqu'elle correspond au début de l'été austral et donc à la période des parades nuptiales et des chants territoriaux. Les points d'écoute ont tous été effectués avec un vent faible ou modéré et une absence de pluie. Au total, 93% des points d'écoute ont été échantillonnés dans les deux heures et demie suivant le lever de soleil, lorsque l'activité vocale des animaux est la plus importante. Tout contact visuel et/ou auditif d'un individu ou d'un groupe d'individus a été noté lors de chaque phase d'écoute. L'espèce, l'effectif et le type de contact (auditif ou visuel) ont obligatoirement été indiqués, ainsi que le sexe et l'âge lorsque cela était possible. Les bénévoles ont pris soin de ne pas compter deux fois le même individu (mémorisation de la position de l'animal). Les bénévoles avaient en leur disposition des jumelles BUSHNELL PERMAFOCUS au grossissement 10x50.

Les bénévoles ont suivi une journée de formation comprenant la présentation du protocole, les critères de détermination des espèces (vue et ouïe), et une mise en application concrète du protocole *in situ* avec utilisation du matériel (annexe 2).

2.2 ANALYSE DES DONNEES

Plusieurs méthodes existent pour déterminer les probabilités de détection, nécessitant ou non le marquage des individus. Durant cette étude, nous avons utilisé un dérivé de la méthode de capture-marquage-recapture (CMR) associée à une analyse de données selon le modèle de Huggins (1989), ainsi qu'une méthode de comptages répétés d'individus non marqués associée à une analyse selon le modèle de Royle (2004). Seules les observations auditives ont été prises en compte dans cette étude basée sur les manifestations vocales des oiseaux étudiés.

2.2.1 Modèles de Huggins

2.2.1.1 Principe

La méthode de la capture-marquage-recapture (CMR) est basée sur l'identification individuelle des individus et leur suivi lors de différentes occasions de capture. Elle permet la création d'histoires de détection individuelles, composées d'une suite de « 1 » et de « 0 » aussi longue que le nombre d'occasions de capture ; le « 1 » représentant la présence de l'individu lors d'une occasion de capture et le « 0 » représentant l'absence de l'individu en question.

Le modèle de Huggins permet d'analyser ces jeux de données et est composé de deux paramètres (Huggins, 1989) :

- p : la probabilité qu'un animal dans la population soit capturé et marqué pour la première fois (nouvel individu jamais marqué auparavant) ;
- c : la probabilité qu'un animal soit de nouveau capturé (individu déjà capturé au moins une fois auparavant).

Les probabilités des histoires de détection sont calculées comme indiqué dans la figure 5 ci-après.

111 - pcc	100 - $p(1-c)(1-c)$
110 - $pc(1-c)$	010 - $(1-p)p(1-c)$
101 - $p(1-c)c$	001 - $(1-p)(1-p)p$
011 - $(1-p)pc$	000 - $(1-p)(1-p)(1-p)$

Figure 5 : Probabilités des histoires de détection pour trois occasions de capture

Le modèle de Huggins permet également de déterminer l'influence de plusieurs variables extérieures sur p et c en calculant des coefficients de régression appelés coefficients β . La probabilité de capture ou de recapture individuelle en fonction des coefficients β peut ensuite être estimée en utilisant les coefficients de régression et la ou les co-variables mesurées pour calculer $\text{logit}(p)$:

$$\text{logit}(p) = x * \beta,$$

puis en effectuant une rétro-transformation :

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-\text{logit})}.$$

Pour savoir quelles sont les co-variables à inclure, différents modèles sont créés en accord avec les hypothèses à tester (ex : la probabilité de détection varie en fonction de la surface en milieu boisé). Ces modèles sont ensuite comparés pour déterminer lequel est le plus adapté. Pour ce faire, lorsque le nombre d'échantillon est faible, on utilise le Critère d'Information d'Akaike corrigé (AICc) (Hurvich & Tsai 1989) ; le meilleur modèle est celui ayant le score d'AICc le plus bas. Deux modèles qui n'ont que deux points d'écart sont considérés comme similaires, mais selon le principe de parcimonie, c'est le modèle composé du plus petit nombre de paramètres qui doit être sélectionné. Le meilleur modèle est donc celui qui explique le plus grand pourcentage

des données observées (ce paramètre étant appelé « poids » du modèle) tout en ayant un nombre réduit de paramètres.

Le modèle de Huggins permet également de déterminer (de manière dérivée) le nombre d'individus présents dans la population échantillonnée en divisant le nombre total de captures par la probabilité de capture :

$$N = \frac{M_{(t+1)}}{[1-(1-p)(1-p)(1-p)]'}$$

avec : N = nombre d'individu estimé sur l'ensemble de la population, p = la probabilité de capture et M(t+1) = le nombre d'animaux marqués au temps t+1.

Les intervalles de confiance à 95% sont calculés de la sorte :

$$\text{limite basse} = \frac{f_0}{C} + M_{(t+1)} \quad ; \text{ et } \text{limite haute} = f_0 * C + M_{(t+1)}$$

$$\text{avec : } f_0 = N - M_{(t+1)} \quad ; C = e^{1.96 \sqrt{\log(1 + CV(f_0)^2)}} \quad ; \text{ et } CV(f_0) = SE(f_0)/f_0.$$

Deux conditions d'application doivent être respectées lorsque l'on utilise des modèles de populations fermées : (1) la population doit être fermée, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de changement démographique (naissances et morts) ni de changement géographique (immigration et émigration) dans la population durant la période d'échantillonnage, et (2) et les animaux doivent conserver leurs marques et celles-ci doivent être bien identifiées à chaque séance d'échantillonnage.

Etant donné qu'il n'existe pas de tests statistiques fiables pour ce genre de modèles basés sur de petits échantillons (A. Besnard, *comm. pers.*, 2022), il est important de diagnostiquer les problèmes d'estimation (Lapointe Saint-Pierre & Mazerolle 2018), qui se manifestent par des erreurs-types presque aussi élevées que l'estimation elle-même ou encore lorsque l'abondance estimée correspond au nombre d'individus marqués.

2.2.1.2 Application

Le design de notre plan d'échantillonnage et d'analyse était basé sur une étude similaire menée sur les Perdrix rouges en 2010 (Jakob et al. 2010). Pour notre étude, chaque point d'écoute était composé de quatre mini-sessions d'écoute, correspondant à quatre occasions de « capture ». Les point d'écoute ne durant que onze minutes, la population est bien considérée comme fermée et les individus pouvaient facilement être suivis de manière individuelle, comme s'ils avaient été marqués, permettant d'analyser la population selon le modèle de Huggins présenté plus haut. Les trois passages ayant été effectués en quatre semaines maximum, les différentes sessions ont été analysées ensemble.

Ces analyses ont été effectuées uniquement pour la Caille des blés et pour la Caille peinte car les histoires de détection étaient trop peu nombreuses pour le Faisan de Colchide et la Perdricule rousse-gorge.

Pour les deux espèces, nous avons testé l'influence de deux variables sur les probabilités de détection individuelles :

- L'heure du début du point d'écoute, sous forme du nombre de minutes séparant le lever du soleil et le début du point d'écoute (variable numérique continue), appelée ci-après « *minutes* ».
- La réponse comportementale des individus suite à la capture c'est-à-dire le fait d'avoir déjà été capturé ou non, appelée ci-après « *comportement* ».

Pour la Caille des blés, qui a obtenu des détections sur un nombre suffisant de points d'écoute (13 au total), nous avons également cherché à tester l'influence des surfaces des différents milieux naturels représentés sur les points d'écoute. Etant donné que certaines des onze variables relatives à la surface des différents milieux naturels sont corrélées, nous avons été obligés de sélectionner le ou les milieux naturels les plus pertinents. Pour cela, nous avons comparé la distribution de la surface de chaque milieu représenté sur les points où la Caille des blés est présente vs. absente à l'aide de tests de Wilcoxon unilatéraux à droite. Nous avons ensuite sélectionné le milieu pour lequel la différence était la plus significative.

Au total, onze modèles ont été créés pour la Caille des blés et sept pour la Caille peinte, comme indiqué dans le tableau 3 ci-après. Les effets de la météo (vent, pluie, couverture nuageuse) et des nuisances sonores n'ont pas été testés car aucune observation n'a été conduite dans ces conditions défavorables. Comme indiqué plus haut, les onze modèles ont été classés selon leur AICc. Le poids a également été regardé, ainsi que les problèmes d'estimation.

L'abondance sur l'ensemble de la surface des points d'écoute a été déterminée pour les meilleurs modèles grâce aux calculs indiqués ci-dessus (section 2.2.1.2). La densité correspondante a été obtenue en divisant ce chiffre par la surface de cette zone. Cette dernière a été obtenue en multipliant le nombre de point d'écoute par leur surface. La surface d'un point est de 44 points d'écoute de 28,3 hectares pour une distance de détection de 300 mètres). Les itinéraires et les points d'écoute étant représentatifs de l'ensemble de milieux naturels de l'île, les résultats peuvent être extrapolés à l'ensemble de la Réunion. L'abondance sur l'île de La Réunion a donc été obtenue en multipliant l'abondance sur les points par la surface de La Réunion (2512 km²).

Tableau 3 : Ensemble des modèles de Huggins testés pour la Caille des blés et la Caille peinte. Le nom des modèles est composé du nom de ces variables qui y expliquent les probabilités de détection (voir liste plus haut). CB = Caille des blés ; CP = Caille peinte.

Modèle	Hypothèse	Espèce(s) cible(s)
M₀	Aucune variable n'explique l'abondance de l'espèce étudiée et chaque animal a donc la même probabilité de capture à chaque visite.	CB + CP
M_{comportement}	La probabilité de capture diffère pour les individus qui n'ont jamais été capturé de ceux qui ont déjà été capturés au moins une fois mais que ces probabilités sont constantes pour toutes les visites et les individus.	CB + CP
M_{visite}	La probabilité de capture change en fonction de la visite, mais reste la même pour tous les individus capturés lors d'une visite donnée.	CB + CP
M_{heure}	La probabilité de capture dépend de l'heure du relevé (nombre de minutes séparant le point d'écoute du lever du soleil).	CB + CP
M_{surface}	La probabilité de capture dépend de la surface du milieu naturel.	CB
M_{comportement+heure}	Réponse comportementale + heure	CB + CP
M_{comportement+visite}	Réponse comportementale + visite	CB + CP
M_{visite+heure}	Visite + heure	CB + CP
M_{comportement+surface}	Réponse comportementale + surface	CB
M_{visite+surface}	Visite + surface	CB
M_{heure+surface}	Heure + surface	CB

2.2.2 Modèles de Royles

2.2.2.1 Principe

Le modèle de Huggins ne nous permet pas de détecter les différences d'abondance entre les points d'écoute et les itinéraires : notre estimation de densité n'est valable que pour la surface des points d'écoute échantillonnés, et par extrapolation, à l'ensemble de La Réunion. Cependant, il existe une classe de modèles dénommés « *N-Mixture* » qui permettent d'estimer la taille d'une population à partir de telles données, telles que le modèle de Royle (2004). L'idée est de considérer les tailles de population spécifiques au site comme des variables aléatoires indépendantes distribuées selon une certaine distribution (distribution de Poisson par exemple).

Pour ces modèles, les individus n'ont pas besoin d'être reconnus individuellement. Seules des données de comptages répétées plusieurs fois selon les sites peuvent suffire. Ces modèles sont basés sur des histoires de détection par site et non individuelles. Ces modèles sont composés de deux paramètres :

- p = probabilité de détection
- λ = abondance calculée sur chaque site en prenant en compte la probabilité de détection

Selon le modèle de Royle (2004) :

$$N_i \sim f(\lambda, \theta) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, M$$
$$Y_{ij} | N_i \sim \text{Binomial}(N_i, p) \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, J_i,$$

; avec N_i = le nombre d'individus non observés sur un site, Y_{ij} = le nombre d'individus durant la $j^{\text{ème}}$ visite, λ_i = l'abondance sur le site i , p = la probabilité de détection, f = une fonction de distribution discrète, θ = paramètres autres que λ dans la fonction f .

Le package « *unmarked* » utilisé dans notre étude (voir section 2.2.3) prend en charge deux type de distribution pour f : de poisson ou binomiale négative. Dans le cas de la distribution de poisson, θ est nul et dans le cas de la négative binomiale, θ est un paramètre de dispersion utilisé lorsque la sur-dispersion est suspectée.

Les co-variables peuvent aussi être appliquées pour expliquer les variations d'abondance par site. L'abondance est alors modélisée sur une échelle logarithmique :

$$\log(\lambda_i) = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta},$$

; avec \mathbf{x} = vecteur d'une co-variable par site et $\boldsymbol{\beta}$ = vecteur des effets correspondants.

La probabilité de détection peut être modélisée de la même manière :

$$\text{logit}(p_{ij}) = \mathbf{v}_{ij}^T \boldsymbol{\alpha},$$

; avec \mathbf{v} = vecteur d'une co-variable par site et $\boldsymbol{\alpha}$ = vecteur des effets correspondants.

Les variables N_i sont latentes et l'analyse est donc effectuée sur la base de la vraisemblance intégrée obtenue en marginalisant chaque N_i de la vraisemblance conditionnelle (Royle 2004) :

$$L(\lambda, p | \{Y_{ij}\}) = \prod_{i=1}^M \left\{ \sum_{N_i=\max(Y_i)}^{\infty} \left(\prod_{j=1}^J \frac{N_{ij}}{(N_i - Y_{ij})!} p^{Y_{ij}} (1-p)^{N_i - Y_{ij}} \right) \frac{e^{-\lambda} \lambda^{N_i}}{N_i!} \right\} .$$

Ce modèle est basé sur les hypothèses d'une population fermée et sur l'indépendance des comptages.

La qualité de l'ajustement des modèles à N-Mixture peuvent être évalués par bootstrap paramétrique à l'aide de la distribution du χ^2 (Mazerolle & Mazerolle 2017).

2.2.2.2 Application

Dans notre étude, chaque point d'écoute a été échantillonné trois fois en trois semaines, schéma qui correspond au modèle de Royle. Cependant, seule la Caille des blés a obtenu un nombre de points d'écoute, où sa présence est avérée, assez important pour l'utiliser (13 points). Nous avons testé l'influence de plusieurs variables quantitatives sur la probabilité de détection :

- L'heure du début du point d'écoute, sous forme du nombre de minutes séparant le lever du soleil et le début du point d'écoute (variable numérique continue), appelée ci-après « minutes ».
- Surface du milieu naturel le plus significatif (expliqué plus haut, au niveau 2.2.1.2) ;

et sur l'abondance :

- Surface du milieu naturel le plus significatif (expliqué plus haut, au niveau 2.2.1.2).

L'ensemble des huit modèles testés est présenté dans le tableau 4. Les modèles ont été ajustés selon la loi négative binomiale et l'indice supérieur d'intégration a été fixé à 100. Le test d'ajustement par bootstraps a été fixé à 100 itérations.

Tableau 4 : Ensemble des huit modèles de Royle testés pour la Caille des blés. Le nom des modèles est sous la forme $M_{x \sim y}$, avec x = le nom des variables qui expliquent la probabilité de détection et y = le nom des variables qui expliquent l'abondance (voir texte ci-dessus).

Modèle	Hypothèse
M_0	Aucune variable n'explique la probabilité de capture et l'abondance.
$M_{\text{heure}^{\sim}}$	La probabilité de capture dépend de l'heure du relevé (et l'abondance n'est expliquée par aucune variable).
$M_{\text{surface}^{\sim}}$	La probabilité de capture est expliquée par la surface d'un milieu naturel (milieu plus représenté sur les points où la Caille des blés est présente que pour les autres).
$M^{\sim}\text{surface}$	L'abondance est expliquée par la surface d'un milieu naturel.
$M_{\text{heure+surface}^{\sim}}$	La probabilité de capture est expliquée par l'heure du relevé et la surface d'un milieu naturel/
$M_{\text{heure}^{\sim}\text{surface}}$	La probabilité de capture dépend de l'heure du relevé et l'abondance de la surface d'un milieu naturel.
$M_{\text{surface}^{\sim}\text{surface}}$	La probabilité de capture et l'abondance dépendent de la surface d'un milieu naturel.
$M_{\text{heure+surface}^{\sim}\text{surface}}$	La probabilité de capture dépend de l'heure du relevé et de la surface d'un milieu naturel et l'abondance de la surface d'un milieu naturel.

2.2.3 Logiciels

Les données ont été analysées dans le logiciel *R* (R Core Team 2013). Le package « *RMark* » (Rakhimberdiev et al. 2019), interface du logiciel *MARK* (White et al. 2001), a été utilisé pour les modèles de Huggins. Le package « *unmarked* » a été utilisé pour les modèles de Royle (Fiske & Chandler 2011). Le logiciel QGIS a été utilisé pour réaliser les cartes et calculer les surfaces des milieux naturels (QGIS Development Team 2022).

3 RESULTATS

3.1 GENERALITES

La durée effective de prospection est d'environ 24h. Au total, sur les trois passages des 44 points d'écoute, nous avons obtenu 95 contacts auditifs et visuels : plus de 40 pour les Cailles des blés et les Cailles peintes, mais uniquement cinq et six pour les Cailles rouges et les Faisans (voir tableau 5 ci-dessous). Par conséquent, seules les données de la Caille des blés et de la Caille peinte peuvent être analysées avec le modèle de Huggins.

Tableau 5 : Nombre d'observations individuelles pour chaque itinéraire et chaque espèce, les trois passages confondus. CB = Caille des blés ; CP = Caille peinte ; CR = Perdricule rousse-gorge ; F = Faisan

	CB	CP	CR	F	Total contacts	Total itinéraires
1	9	1	0	0	10	2
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	2	0	4	0	6	2
6	0	40	1	0	41	2
7	12	0	0	4	16	2
8	1	0	0	0	1	1
9	11	0	0	0	11	1
10	8	0	0	2	10	2
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
Total contacts	43	41	5	6	95	-
Total itinéraires	6	2	2	2	-	7

Concernant les histoires de détections par site (par point d'écoute), seuls 21 sur les 44 points d'écoute ont obtenu au moins un contact (voir tableau 6 ci-dessous). Parmi eux, la Caille des blés a été rencontrée sur 13 points, la Caille peinte sur trois points, la Perdricule rousse-gorge sur deux points et le Faisan de Colchide sur trois. Par conséquent, seules les données de la Caille des blés peuvent être analysées en N-Mixture.

Tableau 6 : Nombre de détections auditives par point d'écoute et par passage. Les points d'écoute sont notés de la forme : numéro d'itinéraire-numéro du point d'écoute.

Point	Espèce	1 ^{er} passage	2 ^{ème} passage	3 ^{ème} passage	Histoire de détection par site
1-1	CB	1	1	1	111
1-2	CB	0	1	1	011
1-3	CB	1	0	1	101
1-4	CB	0	1	0	010
1-5	CB	0	0	1	001
5-4	CB	0	1	1	011
7-1	CB	1	0	0	100
7-2	CB	1	3	2	132
7-4	CB	0	0	5	005
8-3	CB	1	0	0	100
9-7	CB	2	2	7	227
10-1	CB	2	3	2	232
10-3	CB	0	0	1	001
1-5	CP	1	0	0	100
6-1	CP	7	7	8	778
6-2	CP	4	8	6	486
5-1	CR	1	1	1	111
5-4	CR	1	0	0	100
7-1	FC	0	2	0	020
7-2	FC	2	0	0	200
10-2	FC	1	1	0	110

3.2 CAILLE DES BLES

3.2.1 Exploration des données

Sur les 43 contacts de Caille des blés, tous sont des adultes. Parmi ces contacts, 19 mâles seuls ont été détectés, deux couples, un groupe de deux mâles, et un autre groupe de deux adultes au sexe indéterminé. Ces 43 contacts sont répartis sur six itinéraires : Ste Marguerite, Sans Souci, Piton Rouge, Bois Blanc, Mont Vert les Hauts, Coteau des Brèdes.

En comparant graphiquement les surfaces des milieux naturels représentés sur les points où la présence de la Caille des blés est avérée de ceux représentés sur les points où elle n'a jamais été détectée, on remarque que l'espèce semble préférer les milieux de cultures intensives (cannes) et les surfaces bâties (figure 6). Cependant, la différence n'est significative que pour les surfaces de cultures intensives (cannes) ($W = 267,5$, $p\text{-value} = 0,033$). C'est donc cette variable qui a été incluse dans les modèles prenant en compte le milieu naturel.

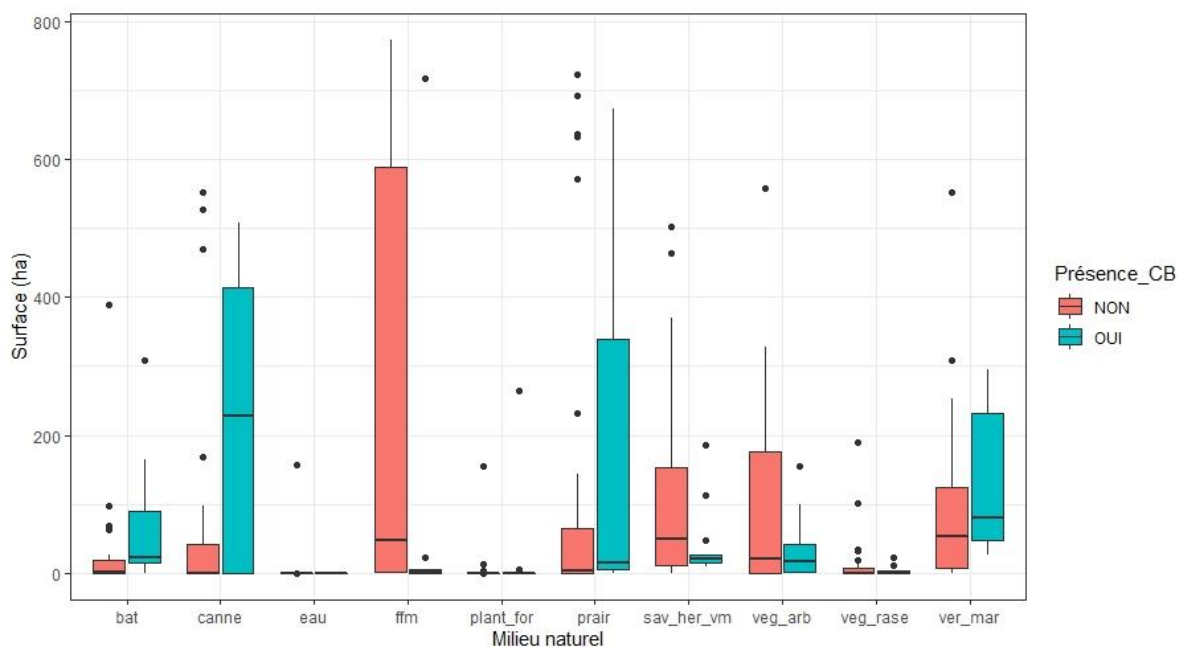


Figure 6 : Comparaison de la distribution des surfaces des milieux naturels représentés sur les points d'écoute où la présence de la Caille des blés est avérée de ceux représentés sur les points où elle n'a jamais été détectée. Les données sont en hectares. bat = surface bâtie, canne = cultures intensives, eau = surface en eau et marais, ffm = forêt primaire / majoritairement indigène, plant_for = plantation forestière, prair = prairies, sav_her_vm = savane herbacée / vigne maronne, veg_arb = végétation arbustive à arborée, veg_rase = végétation rase, Verger et maraîchage

3.2.2 Modèles de Huggins

Au total, 37 histoires de détection individuelles auditives ont été relevées sur 10 points d'écoute. Les deux premiers modèles, M_{heure} et $M_{\text{heure+visite}}$, sont ceux qui représentent le mieux les données, avec des AICc plus faibles que les autres modèles mais non significativement différents (voir tableau 7 ci-après). Les autres modèles ont des poids faibles (inférieurs à 10 %) ou des estimations d'abondance aberrantes.

Tableau 7 : Résultats des onze modèles de Huggins testés pour la Caille des blés. AICc = critère d'information d'Akaike ; $\Delta AICc$ = différence d'AICc avec le plus faible AICc ; N = abondance estimée sur l'ensemble des points d'écoute ; se = écart type de l'abondance.

Modèle	Nombre de paramètres	Poids	AICc	$\Delta AICc$	N	SE
M_{heure}	2	0,50	190,14	0,00	45,31	5,45
$M_{\text{heure+visite}}$	5	0,29	191,23	1,09	40,54	2,39
M_{cultures}	2	0,04	195,36	5,21	44,82	5,23
$M_{\text{comportement}}$	2	0,03	195,93	5,79	43,12	4,03
$M_{\text{visite+cultures}}$	5	0,02	196,56	6,42	42,70	3,83
$M_{\text{heure+comportement}}$	3	0,01	197,76	7,62	58,11	20,84
$M_{\text{cultures+comportement}}$	3	0,01	198,01	7,87	60,91	28,17
$M_{\text{heure+cultures}}$	4	0,01	199,08	8,94	58,13	20,90
M_0	1	0,00	201,57	11,43	58,43	55,39
$M_{\text{visite+comportement}}$	5	0,00	202,27	12,12	40,96	3324,45
M_{visite}	4	0,00	202,85	12,71	40,28	2,28

D'après le principe de parcimonie, il est préférable de sectionner, parmi ces quatre modèles, celui qui a le moins de paramètres, soit M_{heure} . C'est également le modèle qui a le poids le plus important des deux modèles sélectionnés, soit de 50 %. D'après M_{heure} , p et c sont égales et diminuent de lorsque le nombre de minutes séparant le relevé du lever du soleil augmente :

$$\text{logit}(p) = \text{logit}(c) = 1,0 - 0,018 * \text{min.}$$

On a donc une probabilité de détection de $0,74 \pm 0,075$ au lever du soleil, qui descend à $0,64 \pm 0,065$ au bout de 30 minutes, et qui atteint quasiment zéro au bout de trois heures (180 minutes) (figure 7 ci-dessous).

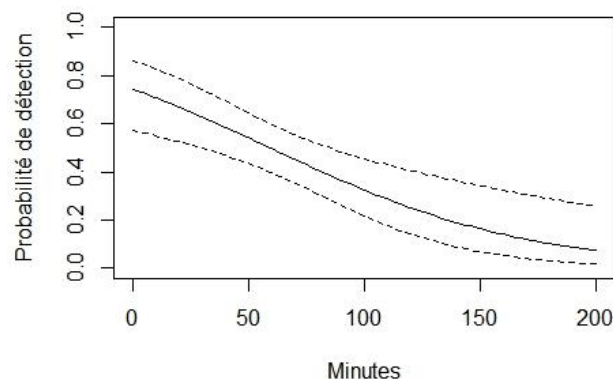


Figure 7 : Représentation graphique du modèle de Huggins M_{heure} représentant la probabilité de détection de la Caille des blés en fonction de l'heure de l'écoute. Les valeurs prédites sont représentées avec la ligne continues et les intervalles de confiance à 95% sont représentés en pointillés. L'heure de l'écoute est représenté sous la forme du nombre de minutes entre le relevé et le lever de soleil.

$M_{\text{heure+visite}}$ a un poids de 29%. Il stipule que p et c sont égales et varient en fonction de l'heure et du numéro de la visite (ou mini-session). L'équation est la même que pour M_{heure} , sauf que l'intercept change en fonction du numéro de la mini-session. Au lever du soleil, la probabilité de détection est donc de $0,62 \pm 0,11$ pour la première mini-session, de $0,74 \pm 0,09$ pour la deuxième, de $0,81 \pm 0,08$ pour la troisième et de $0,80 \pm 0,08$ pour la quatrième (figure 8). La probabilité de détection augmente donc avec la diffusion de la repasse.

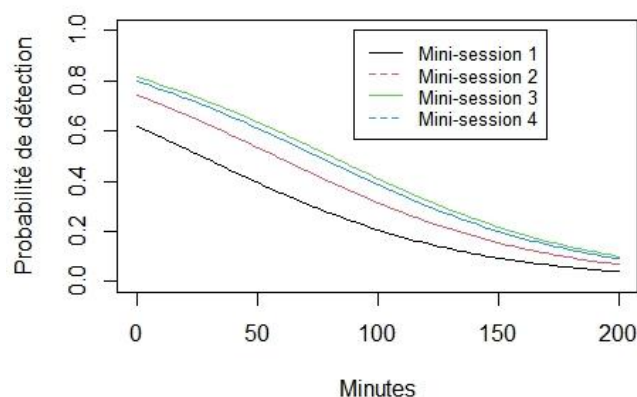


Figure 8 : Représentation graphique du modèle de Huggins $M_{\text{heure+visite}}$ représentant la probabilité de détection de la Caille des blés en fonction de l'heure de l'écoute et du numéro de la mini-session. Les valeurs prédites sont représentées avec la ligne continues et les intervalles de confiance à 95% sont représentés en pointillés. L'heure de l'écoute est représenté sous la forme du nombre de minutes entre le relevé et le lever de soleil.

D'après ces deux modèles, la surface en cultures intensives (cannes) représentée sur le point d'écoute n'influe pas sur la probabilité de détection de la Caille des blés. L'espèce n'exprime pas non plus de réponse comportementale liée au premier contact, tels que la fuite ou l'arrêt des vocalisations.

Ces modèles estiment la taille de la population sur l'ensemble des points d'écoute à $45,31 \pm 5,45$ individus pour le premier modèle et à $40,54 \pm 2,39$ individus pour le second (tableau 7). La densité correspondante est donc de $3,64 \pm 0,44$ individus / km^2 pour le premier modèle et de $3,26 \pm 0,19$ individus / km^2 pour le second. L'île de La Réunion mesurant 2512 km^2 , le nombre total d'individus sur l'île devrait être de 9148 ± 1101 individus pour le premier modèle et de 8186 ± 482 pour le second, donc entre 7704 et 10249 individus.

3.2.3 Modèles de Royle

L'analyse en N-Mixture selon le modèle de Royle montre que les huit modèles testés ont des AICc très proches (tableau 8 ci-dessous).

Tableau 8 : Résultats des huit modèles de Royle testés pour la Caille des blés. AICc = critère d'information d'Akaike ; $\Delta AICc$ = différence d'AICc avec le plus faible AICc.

Modèle	Nombre de paramètres	Poids	AICc	$\Delta AICc$
$M_{\text{heure}\sim}$	4	0,25	173,61	0,00
M_0	3	0,20	174,07	0,46
$M_{\sim\text{cultures}}$	4	0,14	174,76	1,15
$M_{\text{cultures}\sim}$	4	0,13	174,87	1,26
$M_{\text{heure}\sim\text{cultures}}$	5	0,11	175,25	1,64
$M_{\text{cultures}+\text{heure}\sim}$	5	0,09	175,56	1,95
$M_{\text{cultures}\sim\text{cultures}}$	5	0,04	177,26	3,65
$M_{\text{cultures}+\text{heure}\sim\text{cultures}}$	6	0,03	177,79	4,18

D'après le principe de parcimonie, c'est le premier modèle M_0 qu'il faut sélectionner étant donné qu'il ne contient que trois paramètres et que son poids est le plus important (25%). Le modèle est bien ajusté ($\chi^2 = 431,8$, p-value = 0,19). Il indique que les probabilités de détection et l'abondance sont les mêmes pour chaque point d'écoute étudiés avec des valeurs respectives de $0,055 \pm 0,034$ et de $6,41 \pm 4,40$ individus / point d'écoute. La densité équivalente est de $22,7 \pm 15,6$ individus / km², soit $56948,9 \pm 39091,29$ individus sur l'île de La Réunion. Ces estimations de ce modèle semblent incohérentes (voir discussion).

Le modèle M_{heure} est également bien ajusté ($\chi^2 = 444,5$, $p\text{-value} = 0,46$). Il indique que l'abondance semble être la même pour chaque point d'écoute étudiés avec une valeur de $2,9 \pm 3,5$ individus / point d'écoute, soit $10,3 \pm 13,3$ individus / km^2 , ou $25764,7 \pm 30917,6$ individus sur l'île de La Réunion. La probabilité, quant à elle, de détection varie en fonction de l'heure du relevé (figure 9 ci-dessous) :

$$\text{logit}(\lambda) = -0,52 - \text{min} * 0,013.$$

Alors qu'au moment du lever du soleil, la probabilité de détection est de $0,37 \pm 0,44$, elle est de $0,16 \pm 0,19$ au bout de 30 minutes, et presque nulle au bout de trois heures (180 minutes). Cependant, ce modèle semble être défaillant car les intervalles de confiance pour la probabilité de détection sont trop importants.

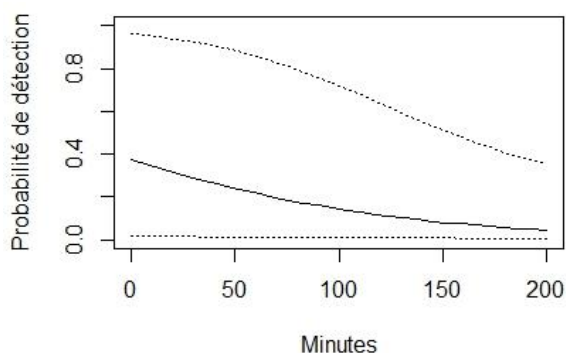


Figure 9 : Représentation graphique du modèle de Royle M_{heure} représentant la probabilité de détection sur les points d'écoute en fonction de l'heure du relevé chez la Caille des blés. Les valeurs prédites sont représentées avec la ligne continues et les intervalles de confiance à 95% sont représentés en pointillés. L'heure de l'écoute est représentant sous la forme du nombre de minutes entre le relevé et le lever de soleil.

Les deux modèles suivants $M_{\sim\text{cultures}}$ et $M_{\text{cultures}\sim}$ ont également ont des poids non négligeables d'environ 15 % et des ajustements corrects (respectivement $\chi^2 = 398,3$, p-value = 0,16 ; et $\chi^2 = 400,6$, p-value = 0,16). Le premier modèle stipule une probabilité de détection de $0,059 \pm 0,036$ et une abondance qui varie en fonction de la surface de cultures intensives (cannes). D'après ce modèle, plus cette surface augmente, plus l'abondance est élevée (voir figure 10 ci-dessous) :

$$\text{logit}(\lambda) = 1,67 + \text{surface} * 0,44.$$

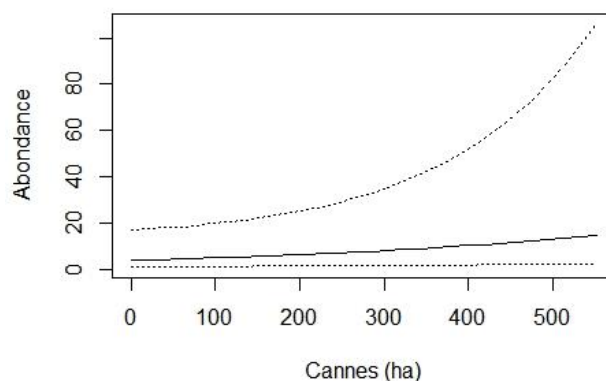


Figure 10 : Représentation graphique du modèle de Royle $M_{\sim\text{cultures}}$ représentant l'abondance sur les points d'écoute en fonction de la surface en culture intensive (cannes) pour la Caille des blés. Les valeurs prédites sont représentées avec la ligne continues et les intervalles de confiance à 95% sont représentés en pointillés.

Le second stipule une abondance de $7,24 \pm 4,81$ par point d'écoute et des probabilités de détection qui augmentent avec la surface de cultures intensives (cannes). D'après ce modèle, plus cette surface augmente, plus la probabilité de détection est élevée (voir figure 11 ci-dessous) :

$$\text{logit}(p) = -3,36 + \text{surface} * 0,0,002.$$

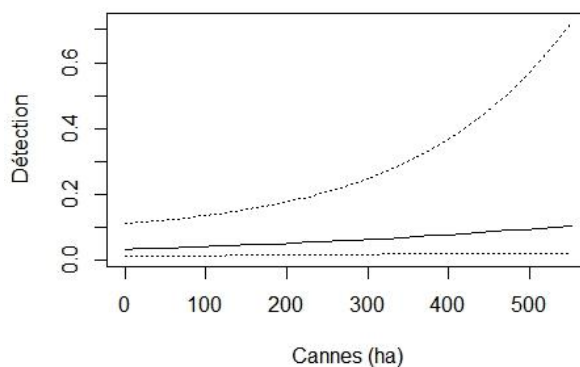


Figure 11 : Représentation graphique du modèle de Royle $M_{\text{culture}\sim}$ représentant la probabilité de détection en fonction de la surface en culture intensive (cannes) pour la Caille des blés. Les valeurs prédites sont représentées avec la ligne continues et les intervalles de confiance à 95% sont représentés en pointillés.

Les modèles $M_{culture\sim}$ et $M_{\sim culture}$ nous apportent des informations contraires et il est donc compliqué de conclure s'il y a plus de Cailles des blés dans les cannes ou s'il elles sont simplement détectées plus facilement. Le modèle $M_{heure\sim}$, quant à lui, a des intervalles de confiance trop important concernant les probabilités de détection et il n'a donc pas été retenu. Seul le modèle M_0 est exploitable.

3.3 CAILLE PEINTE

3.3.1 Exploration des données

Sur les 41 contacts de Caille peinte, tous sont des adultes de sexe indéterminé. Toutes les histoires de détection sont purement auditives. Tous les contacts ont été effectués sur l'itinéraire du Cap Lahoussaye, sauf une observation qui a été effectuée sur l'itinéraire de Ste Marguerite. Au total, seuls trois points d'écoute sont positifs et l'analyse en N-Mixture n'est donc pas possible. Les données ont seulement été analysées selon Huggins. Les co-variables relatives aux surfaces des milieux naturels n'ont également pas été incluses.

3.3.2 Modèles de Huggins

D'après les sept modèles testés, les modèles M_0 , M_{heure} et $M_{comportement}$ ont les AIC les plus faibles (voir tableau ci-après).

Tableau 9 : Résultats des dix meilleurs modèles sélectionnés par le critère d'Akaike pour la Caille peinte.
AICc = critère d'information d'Akaike ; $\Delta AICc$ = différence d'AICc avec le plus faible AICc ; N = abondance estimée sur l'ensemble des points d'écoute ; se = écart type de l'abondance.

Modèle	Nombre de paramètres	Poids	AICc	$\Delta AICc$	N	se
M_0	1	0,36	171,7	0,0	88,5	21,6
M_{heure}	2	0,27	172,3	0,6	98,7	31,8
$M_{comportement}$	2	0,21	172,8	1,1	371,0	1670,1
$M_{heure+comportement}$	3	0,09	174,5	2,7	149,9.10 ⁸	182,9.10 ⁸
M_{visite}	4	0,02	177,1	5,4	88,2	21,5
$M_{heure+visite}$	5	0,01	177,8	6,1	98,2	31,6
$M_{visite+comportement}$	5	0,01	178,5	6,8	44,4	22498,4

Parmi eux, le modèle M_0 a le moins de paramètres et le poids le plus important (36 %). Il donc considéré comme le mieux ajusté. Il indique que les probabilités de détection des individus et des mini-sessions sont identiques, avec une valeur moyenne de $0,144 \pm 0,040$.

Le modèle M_{heure} représente aussi assez bien les données avec un poids de 27 %. D'après M_{heure} , p et c sont égales et diminuent de lorsque le nombre de minutes séparant le relevé du lever du soleil augmente, tout comme cela a été montré pour la Caille des blés :

$$\text{logit}(p) = \text{logit}(c) = -0,85 - 0,0014 * \text{min.}$$

On a donc une probabilité de détection de $0,29 \pm 0,17$ au lever du soleil, qui descend à $0,22 \pm 0,088$ au bout de 30 minutes, et qui atteint quasiment zéro au bout de trois heures (180 minutes) (voir figure 10 ci-dessous).

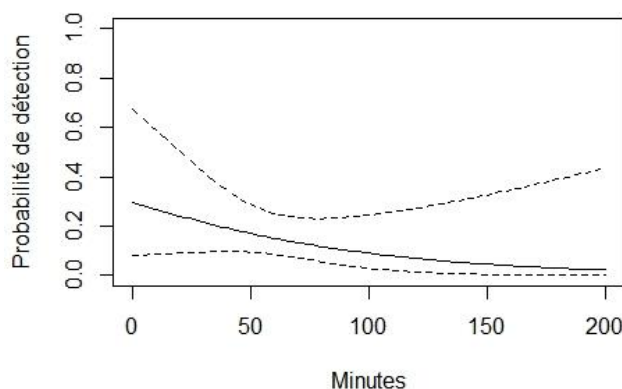


Figure 12 : Représentation graphique du modèle de Huggins M_{heure} représentant la probabilité de détection de la Caille peinte en fonction de l'heure de l'écoute. Les valeurs prédites sont représentées avec la ligne continues et les intervalles de confiance à 95% sont représentés en pointillés. L'heure de l'écoute est représenté sous la forme du nombre de minutes entre le relevé et le lever de soleil.

Le modèle $M_{\text{comportement}}$ n'est finalement pas valide puisque les écart-types de l'estimation de l'abondance sont très élevés. La repasse n'a donc pas d'effet pour cette espèce. Le modèle M_0 estime la taille de la population à $85,51 \pm 21,59$ individus par point d'écoute et le modèle M_{heure} l'estime à $98,65 \pm 31,79$, soit respectivement $7,11 \pm 1,73$ et $7,93 \pm 2,56$ individus par kilomètre carré. La taille de la population réunionnaise serait donc de 1787 ± 436 individus selon M_0 et de 1992 ± 642 pour M_{min} . Elle semble donc comprise entre 1350 et 2634 individus.

4 DISCUSSION

4.1 RESULTATS

Nous avons déterminé pour la Caille et des blés et pour la Caille peinte plusieurs modèles permettant de mettre de déterminer les probabilités de détection et les densités absolues en fonction de plusieurs variables explicatives (tableau 10).

Tableau 10 : Résumé des modèles sélectionnés pour la Caille des blés et pour la Caille peinte.

Espèce	Modèle	Poids	Probabilité de détection	Abondance sur l'île de La Réunion
Caille des blés	Huggins M_{heure}	50%	$P = 0,74 \pm 0,075$ au lever du soleil ; Diminue avec la différence de temps entre le révéle et le lever du soleil	9148 ± 1101
Caille des blés	Huggins $M_{\text{heure+visite}}$	29%	$P = 0,62 \pm 0,11$ au lever du soleil pour la première mini-session ; Augmente avec la repasse : $P = 0,81 \pm 0,08$ pour la troisième mini session ; Diminue avec la différence de temps entre le révéle et le lever du soleil	8186 ± 482
Caille peinte	Huggins M_0	36%	$P = 0,14 \pm 0,040$	1787 ± 436
Caille peinte	Huggins M_{heure}	27%	$P = 0,29 \pm 0,17$ au lever du soleil ; Diminution avec la différence de temps entre le révéle et le lever du soleil	1992 ± 642

Le modèle de Huggins M_{heure} , indiquant des probabilités de détection variables en fonction de l'heure du relevé, était le mieux ajusté pour la Caille des blés, montrant l'importance d'effectuer les relevés au lever du soleil. Il indique qu'une heure et demie après le lever du soleil, la probabilité de détection chute de 50%. Le pic d'activité vocal du milieu de matinée avait également été montré par Mur (1994). Mur (1994) avait aussi montré une variabilité inter- et intra-individuelle, qui semble assez faible dans notre cas à la vue des écart-types (tableau 10). Les facteurs de variation sur le nombre de vocalisations émises relevés dans cette étude pouvaient être liés aux conditions météorologiques, à l'état physiologique des couples, et à l'utilisation de la repasse pour les mâles appariés (Mur, 1994).

Le modèle $M_{\text{heure+visite}}$, ajoutant à M_{heure} un effet du numéro de la mini-session, illustre ce dernier point. Ce modèle indique que la probabilité de détection augmente de 0,1 après la diffusion de la première repasse, et encore de 0,1 après la diffusion de la deuxième repasse (la troisième repasse ne semblait cependant pas améliorer ce score). Il est probable qu'avec d'avantage d'histoires de détection individuelles, ce modèle aurait pu avoir un poids plus important que M_{heure} .

Les modèles de Huggins ne peuvent pas détecter les différences de densités en fonction de plusieurs variables telles que les milieux naturels, à l'inverse des modèles *N-Mixture* comme le modèle de Royle (2004). Ces modèles nécessitent un certain nombre de données de comptage pour une espèce cible sur un ensemble de points d'écoute, ce qui n'a été possible que pour la Caille des blés (13 points d'écoute). Le modèle M_0 de Royle pour la Caille des blés ne corrobore pas avec les modèles de Huggins sélectionnés plus haut. Il indique une abondance très élevée et une probabilité de détection très faible. Il semble avoir du mal à différencier ces deux paramètres et confondre faible abondance et faible probabilité de détection. Cette instabilité peut être expliquée par le fait que les modèles *M-Mixture* sont très sensibles aux faibles probabilités de détection (Couturier et al. 2013). Il serait intéressant de multiplier les comptages sur différents points d'écoute pour pouvoir les établir sur les autres espèces cibles et pour améliorer leur robustesse pour la Caille des blés.

Pour la Caille peinte, la probabilité de détection est beaucoup plus faible que pour la Caille des blés. Le modèle qui a le poids le plus important, M_0 , indique une probabilité de détection similaire pour tous les individus, qui est de 0,14. Comme pour la Caille des blés, nous avons également un effet de l'heure puisque le deuxième modèle ayant le poids le plus important indique également que la probabilité de détection chute de 50% une heure et demie après le lever du soleil. A l'inverse de la Caille des blés, l'effet repasse n'a pas pu être démontré.

La distance de détection pour la Caille des blés (300 mètres) a été obtenue d'après Mur (1994), qui a déterminé ces valeurs dans des écosystèmes de plaine et de montagne. Nous avons utilisé la même pour la Caille peinte, mais il est possible que cette dernière ne soit pas adaptée et que la distance de détection réelle soit en réalité plus faible. De plus, cette distance ne prend pas en compte les individus qui seraient situés à plus de 300 mètres avant la diffusion de la repasse et qui seraient attirés par sa diffusion et se déplaceraient alors dans le rayon des 300 mètres. L'existence de ces biais augmenterait artificiellement les abondances que nous avons déterminées.

Que ce soit pour des espèces à distribution restreinte (Perdicule rousse-gorge, Faisan de Colchide) ou des espèces à plus large répartition mais très discrètes (Turnix de Madagascar et Perdrix de Madagascar), un protocole d'étude spécifique devrait leur être consacré selon un plan d'échantillonnage bien défini afin de mieux appréhender et estimer les tailles de leur population respective.

4.2 COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DES IKA

Si l'on en vient à comparer le nombre de contacts obtenus pour les quatre espèces par itinéraire, nous remarquons de manière générale que la méthode des points d'écoute avec émission de la repasse s'est avérée plus efficace que celle des prospections pédestres sur les itinéraires réalisés par la SEOR (IKA) (Chiron & Ferret, 2022).

En effet, à l'exception du Faisan de Colchide où le nombre de contacts est plus élevé à partir des prospections par IKA, le nombre de contacts pour la Caille peinte, la Caille de Chine et la Perdicule rousse-gorge est nettement supérieur lors d'une écoute avec stimulation des individus chanteurs (tableau 11). La Perdicule rousse-gorge, non observée lors des prospections pédestres de 2020-2021 sur les transects, a pu être détectée sur deux des douze transects à partir de points d'écoute utilisant la repasse. Il convient néanmoins de noter que pour la Caille de Chine, six transects ont permis de noter la présence de l'espèce par IKA contre seulement deux à partir des points d'écoute.

Tableau 11 : Nombre de contacts enregistrés pour chacune des 4 espèces recherchées selon la nature du protocole, la durée de prospection associée et l'itinéraire (Chiron et Ferret, 2022). CP = Caille peinte ; CB = Caille des blés ; PRG = Perdicle rousse-gorge ; FC = Faisan de Colchide

Itinéraire	Effort prospection (minutes)		CP (nombre de contacts)		CB (nombre de contacts)		PRG (nombre de contacts)		FC (nombre de contacts)	
	IKA	Points d'écoute avec repasse	IKA	Points d'écoute avec repasse	IKA	Points d'écoute avec repasse	IKA	Points d'écoute avec repasse	IKA	Points d'écoute avec repasse
1	246	165	1	1	-	9	-	-	-	-
2	212	165	3	-	-	-	-	-	-	-
3	269	33	-	-	-	-	-	-	-	-
4	152	99	-	-	-	-	-	-	-	-
5	205	132	1	-	-	2	-	4	-	-
6	162	66	1	40	-	-	-	1	-	-
7	239	132	1	-	2	12	-	-	10	4
8	229	99	-	-	2	1	-	-	-	-
9	480	165	1	-	4	11	-	-	-	-
10	156	99	-	-	1	8	-	-	17	2
11	432	132	-	-	-	-	-	-	-	-
12	126	165	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	2908	1452	8	41	9	43	0	5	27	6

4.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour résumer, cette étude a permis de détecter les probabilités de détection et les densités pour deux des quatre espèces cibles de gibier à plumes de la famille des Phasianidés à La Réunion, ce qui n'avait pas encore été fait auparavant. Elle a également permis la formation de douze bénévoles sur les gibiers à plumes de La Réunion et sur les méthodes de comptage via points d'écoute.

Il serait intéressant de continuer cette étude en 2022 / 2023 sur les itinéraires où la présence de la Perdicle rousse-gorge, du Faisan de Colchide, de la Caille des blés et de la Caille peinte est avérée et sur de nouveaux itinéraires tracés pour ces espèces. Cela permettrait la détermination des probabilités de détection pour les deux espèces manquantes, et la mise en place des modèles plus complexes prenant en compte les surface des milieux naturels. Un deuxième volet de cette étude pourrait être réalisé à faible coût puisque les bénévoles formés pourraient participer une deuxième fois et le matériel acquis (jumelles, enceintes...) ainsi que les scripts d'analyse de données pourraient être ré-utilisés.

5 REFERENCES

- Adkins-Regan E. 2016. Pairing Behavior of the Monogamous King Quail, *Coturnix chinensis*. PLOS ONE **11**:e0155877. Public Library of Science.
- Barré N, Barau A, Jouanin C. 1996. Oiseaux de La Réunion Editions Didier Millet.
- Besnard A, Salles JM. 2010. Suivi scientifique d'espèces animales. Aspects méthodologiques essentiels pour l'élaboration de protocoles de suivis. Note méthodologique à l'usage des gestionnaires de sites Natura 2000.
- Chiron D, Ferret P. 2022. Etude des Phasianidés, Turnicidés et Colombidés nicheurs sur l'île de La Réunion : Abondance, tendance d'évolution, distribution et phénologie de reproduction.
- Couturier T, Cheylan M, Bertolero A, Astruc G, Besnard A. 2013. Estimating abundance and population trends when detection is low and highly variable: A comparison of three methods for the Hermann's tortoise. *The Journal of Wildlife Management* **77**:454–462.
- Fiske I, Chandler R. 2011. Unmarked: an R package for fitting hierarchical models of wildlife occurrence and abundance. *Journal of statistical software* **43**:1–23.
- Huggins RM. 1989. On the statistical analysis of capture experiments. *Biometrika* **76**:133–140.
- Hurvich CM, Tsai C-L. 1989. Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika* **76**:297–307.
- Jakob C, Ponce-Boutin F, Besnard A, Eraud C. 2010. On the efficiency of using song playback during call count surveys of Red-legged partridges (*Alectoris rufa*). *European journal of wildlife research*. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag.
- Lapointe Saint-Pierre M, Mazerolle M. 2018. Analyses de trois populations de tortues des bois (*Glyptemys insculpta*) du Sud du Québec et amélioration du protocole d'échantillonnage. Page 17. Québec.
- Marion WR, O'Meara TE, Maehr DS. 1981. Use of playback recordings in sampling elusive or secretive birds. *Studies in Avian Biology* **6**:81–85.
- Mazerolle MJ, Mazerolle MMJ. 2017. Package 'AICcmodavg.' R package **281**.
- Mur P. 1994. Contribution à la gestion des populations paléarctiques de caille des blés (*Coturnix coturnix coturnix* L.) dans la phase européenne de son cycle annuel. Rennes I.
- Nowak-Boyd L. 2014. Estimating Abundance and Limiting Factors of Ring-Necked Pheasants in Western New York. State University of New York.
- QGIS Development Team. 2022. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Available from <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.

- Rakhimberdiev JL with code contributions from E, Augustine B, Collier DT and BM and example data and analysis from B, Rotella J, Pavlacky D, Paul A, Phillips LE-, Ivan J, Wood and C. 2019. RMark: R Code for Mark Analysis.
- Royle JA. 2004. N-Mixture Models for Estimating Population Size from Spatially Replicated Counts. *Biometrics* **60**:108–115.
- Safford RJ, Hawkins AFA. 2013. Birds of Africa. The Malagasy Region **VIII**:1024. Christopher Helm London (UK).
- Salamolard M, Couzi F-X. 2002. Etude des Phasianidés, Turnicidés et Colombidés à La Réunion. SEOR, ONF.
- Tesson JL, Boutin JM. (n.d.). La Caille des blés (*Coturnix Coturnix*). Page 9. Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage.
- White GC, Burnham KP, Anderson DR. 2001. Advanced features of program MARK. Pages 368–377 *Wildlife, land, and people: priorities for the 21st century. Proceedings of the second international wildlife management congress. The Wildlife Society, Bethesda, Maryland, USA.*