

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES
de BORDEAUX

AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DES DOMAINES VITAUX
ET DE LA SÉLECTION DE L'HABITAT PAR LE
BUSARD DE MAILLARD (*CIRCUS MAILLARDI*) A
L'ILE DE LA REUNION

LECLERC Kalyan

Spécialisation : Gestion des Ressources et de l'Environnement

Étude réalisée au Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (1919 route de Mende, campus du CNRS, 34293 Montpellier 5), pour la Société d'Études Ornithologique de La Réunion (13 ruelle des Orchidées, Cambuston, 97440 Saint André)

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES de
BORDEAUX

AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DES DOMAINES VITAUX ET DE LA SÉLECTION DE L'HABITAT PAR LE BUSARD DE MAILLARD (*CIRCUS MAILLARDI*) A L'ILE DE LA REUNION



LECLERC Kalyan

Spécialisation : Gestion des Ressources et de l'Environnement

Étude réalisée au Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (1919 route de Mende, campus du CNRS, 34293 Montpellier 5), pour la Société d'Études Ornithologique de La Réunion (13 ruelle des Orchidées, Cambuston, 97440 Saint André).

Partenaires financeurs :



Tereos



- 2019 -

Préface

Je tiens à remercier pour leur aide au cours de ce stage, les personnes suivantes :

Mes encadrants :

- AUGIRON Steve, Responsable scientifique du Prog Feder ECoPap.
- BESNARD Aurélien, Maître de conférences en biostatistiques et dynamique des populations à l'École Pratique des Hautes Études.
- CHIRON Damien, Coordinateur du programme Feder ECoPap.
- CORNULIER Thomas, Professeur à l'Université d'Aberdeen, Membre du comité de pilotage du programme Feder ECoPap.

Ma relectrice :

- SINIMALÉ Marie Germaine (Monmon), enseignante.

*« Perdu sur la montagne, entre deux parois hautes,
Il est un lieu sauvage, au rêve hospitalier,
Qui, dès le premier jour, n'a connu que peu d'hôtes ;
Le bruit n'y monte pas de la mer sur les côtes,
Ni la rumeur de l'homme : on y peut oublier. [...] »*

Le Bernica, Charles-Marie LECONTE DE LISLE

Table des matières

Introduction	1
1- Matériel et méthodes.....	5
1.1. Présentation du site d'étude.....	5
1.2. Capture, pose des GPS-GSM, présentation des individus suivis et des données récoltées	6
1.3- Quantification des domaines vitaux des individus	9
1.4- Sélection de l'habitat	11
1.4.1- Utilisation du ratio de sélection	16
1.4.2- Utilisation d'une fonction de sélection de la ressource.....	16
2- Résultats.....	17
2.1- Quantification des domaines vitaux des individus	17
2.2- Étude de la sélection de l'habitat	21
2.2.1- Utilisation du ratio de sélection	21
2.2.2- Utilisation d'une fonction de sélection de la ressource.....	23
3- Discussion.....	28
3.1- Quantification des domaines vitaux des individus	28
3.2- Étude de la sélection de l'habitat	28
3.3- Perspectives de l'étude	32
Conclusion.....	33
Bibliographie.....	34

Liste des figures :

FIGURE 1 : PAPANGUE MALE (<i>CIRCUS MAILLARDI</i>) EN VOL (CREDIT PHOTO : SEOR).....	2
FIGURE 2 : PAPANGUE FEMELLE (<i>CIRCUS MAILLARDI</i>) EN VOL (CREDIT PHOTO : SEOR).	2
FIGURE 3 : LES QUATRE VOLETS DU PROGRAMME « ÉCOLOGIE ET CONSERVATION DU PAPANGUE ».	4
FIGURE 4 : CARTE DU CONTOUR (EN POINTILLES) ET DES PRINCIPAUX AXES DE COMMUNICATION (EN TRAITS PLEINS) DE L'ÎLE DE LA REUNION, AVEC SA LOCALISATION DANS LE SUD-OUEST DE L'OCEAN INDIEN (SOURCE : GEOREFERENCMENT DE CARTES DU PACKAGE GGMAP, v3.0.0,(KAHLE & WICKHAM,2013)).	5
FIGURE 5 : CARTE MONTRANT L'ORIGINE DES INDIVIDUS EQUIPES DE GPS-GSM.....	7
FIGURE 6 : PHOTOS D'UN PAPANGUE EQUIPE D'UN GPS-GSM, AVANT RELACHE (L'APPAREIL EST INDIQUE PAR LA FLECHE ROUGE) (PHOTO PERSONNELEL).	8
FIGURE 7 : REPRESENTATION SUR UNE DIMENSION D'UNE ESTIMATION DE NOYAU DE DENSITE, EXTRAIT DE CONTRIBUTEUR A WIKIPEDIA, ESTIMATION PAR NOYAU [WIKIPEDIA S.D.]....	9
FIGURE 8 : REPARTITION DES LOCALISATIONS ALEATOIRES, REPRESENTANT LA DISPONIBILITE, AVEC UNE DISTRIBUTION CONTRAINTE OU PUREMENT ALEATOIRE, AU NIVEAU DU DOMAINE VITAL OU DU PAYSAGE (EXEMPLE AVEC L'INDIVIDU X941, EN DEHORS DE LA PERIODE DE REPRODUCTION DE 2017). LE CENTRE D'ACTIVITE POUR CETTE SAISON A ETE REPRESENTE EN ROSE.	13
FIGURE 9 : SURFACE DES DOMAINES DE CŒUR ET DES DOMAINES VITAUX DE CHACUN DES SIX PAPANGUES MALES ADULTES SUIVIS AU COURS DE CETTE ETUDE ENTRE 2017 ET 2019, POUR CHAQUE SAISON DE SUIVI. (« REPRO. » : SAISON DE REPRODUCTION, DU 1 ^{ER} JANVIER AU 31 AOUT ; « HORS-REPRO. » : SAISON HORS REPRODUCTION, DU 1 ^{ER} SEPTEMBRE AU 31 DECEMBRE).	18
FIGURE 10 : VISUALISATION DU CHANGEMENT DE TERRITOIRE DE L'INDIVIDU X944, ENTRE 2018 ET 2019.	18
FIGURE 11 : ÉVOLUTION MOIS APRES MOIS DE LA SURFACE DES DOMAINES VITAUX DES SIX PAPANGUES MALES ADULTES SUIVIS AU COURS DE CETTE ETUDE ENTRE 2017 ET 2019. LES BANDES ROSES REPRESENTENT LES SAISONS DE REPRODUCTION DEFINIES A PRIORI.	19
FIGURE 12 : ÉVOLUTION MOIS APRES MOIS DE LA SURFACE DES DOMAINES DE CŒUR DES SIX PAPANGUES MALES ADULTES SUIVIS AU COURS DE CETTE ETUDE ENTRE 2017 ET 2019. LES BANDES ROSES REPRESENTENT LES SAISONS DE REPRODUCTION DEFINIES A PRIORI.	20
FIGURE 13 : REPRESENTATION DES DIFFERENTS HABITATS DANS LES DOMAINES VITAUX ET DOMAINES DE CŒUR CALCULES POUR LES SIX PAPANGUES MALES ADULTES SUIVIS AU COURS DE CETTE ETUDE ENTRE 2017 ET 2019.	21
FIGURE 14 : VALEUR DES RATIOS DE SELECTION DES HABITAT CONSIDERES, POUR CHACUN DES NIVEAUX D'ETUDE ET CHACUN DES TYPES DE DISTRIBUTION, DES SIX PAPANGUES MALES ADULTES SUIVIS AU COURS DE CETTE ETUDE ENTRE 2017 ET 2019.	22
FIGURE 15 : COMPARAISON DES RESULTATS DES FONCTIONS DE SELECTION DE LA RESSOURCE AU NIVEAU DU PAYSAGE, POUR LES DEUX TYPES DE DISTRIBUTION DES LOCALISATIONS ALEATOIRES.	24
FIGURE 16 : COMPARAISON DES RESULTATS DES FONCTIONS DE SELECTION DE LA RESSOURCE AU NIVEAU DU DOMAINE VITAL, POUR LES DEUX TYPES DE DISTRIBUTION DES LOCALISATIONS ALEATOIRES.	25

FIGURE 17 : COMPARAISON DES RESULTATS DES FONCTIONS DE SELECTION DE LA RESSOURCE POUR LA VARIABLE “PENTE”, AUX DEUX NIVEAUX D’ETUDE, POUR LES DEUX TYPES DE DISTRIBUTION DES LOCALISATIONS ALEATOIRES.....	26
FIGURE 18 : COMPARAISON DES RESULTATS DES FONCTIONS DE SELECTION DE LA RESSOURCE POUR LES VARIABLES DE DISTANCE AUX INFRASTRUCTURES, AUX DEUX NIVEAUX D’ETUDE, POUR LES DEUX TYPES DE DISTRIBUTION DES LOCALISATIONS ALEATOIRES. (“DIST_ELE” : DISTANCE AUX LIGNES ELECTRIQUES ; “DIST_ROUT” : DISTANCE AUX ROUTES).	27

Liste des tableaux :

TABLEAU 1: RESUME DES INFORMATIONS CONCERNANT LE FONCTIONNEMENT DES GPS-GSM POUR CHACUN DES SIX PAPANGUE SUIVIS ENTRE 2017 ET 2019 (M : « MALE », A : « ADULTE »).....	6
TABLEAU 2 : PERIODES DE SUIVI POUR CHACUN DES SIX PAPANGUE SUIVIS PAR GPS-GSM ENTRE 2017 ET 2019.	10
TABLEAU 3 : RECLASSIFICATION DES CATEGORIES D’HABITATS ISSUES DE CHIRON,D., COORDINATEUR DU PROGRAMME FEDER ECOPAP.....	14
TABLEAU 4 : REPRESENTATIVITE GLOBALE ET COMPOSITION DE LA CATEGORIE « AGRICULTURE DIVERSIFIEE » AU DEUX NIVEAUX D’ETUDE.....	15
TABLEAU 5 : SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS DE L’ETUDE DE LA SELECTION DE L’HABITAT DE SIX PAPANGUES MALES ADULTES, ENTRE 2017 ET 2019.	29

Introduction

La biologie de la conservation est une science à l'interface entre de nombreuses disciplines, telles que la biologie des populations, la génétique, ou encore la gestion des ressources naturelles (Soulé, 1985), et peut être définie comme « la science appliquée au maintien de la diversité biologique terrestre » (Hunter & Gibbs, 2007).

Cependant, de par l'ampleur de la tâche, une priorisation des espèces à sauvegarder est faite sur la base de leur statut de conservation. Ce statut, établi par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), une « union de Membres composée de gouvernements et d'organisation de la société civile » (UICN, 2019), est lui-même basé sur des critères de démographie et de répartition de chaque espèce, et nécessite donc l'étude et la caractérisation de ces critères au préalable, pour chaque espèce.

De façon concrète, la conservation des espèces menacées passe par des actions dépendant de la connaissance : de leur répartition géographique, de la dynamique de leur population, et des habitats qu'elles sélectionnent. La connaissance de la répartition de l'Émyde lépreuse (*Mauremys leprosa*), tortue aquatique menacée du sud de l'Europe, a par exemple permis de proposer l'amélioration des réseaux d'espaces protégés réglementaires, afin de mieux protéger cette espèce (Courmont & De Sousa, 2011). Chez le Râle des Genêts (*Crex crex*), oiseau emblématique des milieux agricoles en France, la prise en compte du cycle de reproduction de l'espèce a abouti à la mise en place de techniques de fauche des prairies moins nuisibles à l'espèce (Hennique *et al.*, 2013).

La sélection de l'habitat est définie comme « l'utilisation disproportionnée d'un habitat [par rapport à sa disponibilité] par une espèce vivante », et peut être étudiée à plusieurs échelles géographiques (Johnson, 1980, Mayor *et al.*, 2009). Une étude chez le Puma (*Puma concolor*) en Californie a par exemple montré que cette espèce sélectionne différemment certains éléments de son environnement, suivant qu'on étudie cette sélection au niveau de son territoire, ou au niveau du paysage qui l'entoure (Zeller *et al.*, 2017, Bauder *et al.*, 2018). Les connaissances obtenues par l'étude de la sélection de l'habitat et des sources de perturbation d'origine anthropique apparaissent comme cruciales pour la conservation des espèces, car elles peuvent directement être utilisées dans l'amélioration « du potentiel d'accueil » de certains milieux avec l'exemple de la Loutre (*Lutra lutra*) en favorisant le re-méandrage de cours d'eau et la végétalisation des berges (Khun *et al.*, 2019), et en proposant la rédaction de cahiers des charges pour des pratiques agricoles favorisant l'habitat des espèces de papillon du genre *Maculinea* (Dupont, 2010).

Dans la bibliographie, l'étude de la sélection de l'habitat d'une espèce donnée va de pair avec celle de son domaine vital (Forester *et al.* 2002, Makowski *et al.* 2006), défini comme « l'aire traversée par un individu au cours de ces activités habituelles de recherches de nourriture, de reproduction et d'élevage des jeunes » (Burt, 1943). Étudiées ensemble, ces connaissances permettent d'identifier les habitats utilisés de façon sélective par rapport aux autres habitats disponibles au sein du domaine vital des individus de l'espèce étudiée (Atuo *et al.*, 2019, Knapp & Owens 2005, Zeal *et al.* 2012), en faisant l'hypothèse que l'utilisation sélective d'un habitat donné est une mesure indirecte de sa qualité pour l'espèce. L'étude de la sélection de l'habitat à une échelle plus large permet quant à elle de mieux comprendre le choix de l'emplacement du domaine vital de chaque individu (Zeller *et al.*, 2017, Bauder *et al.*, 2018). La connaissance de la taille des domaines vitaux et de la sélection de l'habitat est également cruciale lors d'opérations de translocations d'espèces menacées, afin d'estimer le nombre

d'individus pouvant établir leur domaine sur un territoire donné, mais surtout de choisir l'habitat le plus favorable à la réussite de cette translocation (Buckland *et al.* 2014, Massaro *et al.* 2018).

A La Réunion, le Busard de Maillard (*Circus maillardi*, Verreaux 1862), appelé Papangue localement, est le dernier rapace endémique de l'île (**Figure 1** et **Figure 2**). Ayant disparu de l'île Maurice (Mourer-Chauviré *et al.*, 2004), l'effectif de sa population actuelle est compris entre 200 et 520 individus, avec un dernier recensement en date dénombant 151 couples reproducteurs observés et 90 juvéniles (Grondin & Philippe 2011). Ce faible effectif en fait l'un des Busards les plus menacés au monde, classé par l'UICN dans la catégorie « En danger » depuis 2000 (BirdLife International, 2016), l'année de sa séparation taxonomique d'avec le Busard de Madagascar (*Circus macroscelus*, Newton 1863) sur des bases génétiques (Simmons, 2000). Le Papangue est aussi aujourd'hui l'espèce du genre *Circus* ayant l'aire de répartition la plus restreinte au monde, inférieure à 2500 km², soit l'équivalent d'un département comme les Yvelines (78).



Figure 1: Papangue mâle (*Circus maillardi*) en vol (crédit photo : SEOR).



Figure 2 : Papangue femelle (*Circus maillardi*) en vol (crédit photo : SEOR).

Malgré son statut de conservation défavorable, les connaissances sur l'occupation de l'espace et la sélection de l'habitat par le Papangue restent encore lacunaires. En effet, la seule estimation de la taille des domaines vitaux réalisée uniquement à partir d'observations directes date d'il y a plus de 40 ans (Clouet, 1978). La détermination de la sélection en termes d'habitat n'a, elle aussi, été réalisée qu'à partir d'observations directes au cours de focales d'observations en points fixes (Bretagnolle *et al.*, 2000, Valette, 2013). Ces modes d'observations directes présentent l'inconvénient de ne pas permettre un suivi continu des oiseaux, et rendent les conclusions des études qui peuvent être faites très dépendantes de la détectabilité de ces oiseaux.

La forte valeur patrimoniale et le statut de conservation de l'espèce a poussé la Société d'Étude Ornithologique de La Réunion (SEOR)¹ à engager des actions en faveur de la protection de cette espèce. Créée en 1997, cette association de type Loi 1901, comportant aujourd'hui 18 salariés, a pour but l'amélioration des connaissances et la sensibilisation du public pour la conservation de l'avifaune réunionnaise. Engagée dès sa création dans la préservation du Papangue, les différentes études auxquelles elle a participé ont permis de mieux connaître la distribution de l'espèce à l'échelle de l'île ainsi que la sélection de l'habitat (Bretagnolle *et al.*, 2000), au moyen d'observations par points fixes.

En 2011, la rédaction d'un plan de conservation (Grondin & Philippe, 2011) avait permis de définir des objectifs prioritaires et de prioriser les actions de conservation de l'espèce. Il s'agissait à l'époque de réaliser des actions sur cinq ans, afin de prévenir le déclin de la population et, à moyen terme, d'améliorer le statut de conservation de l'espèce, par la « stabilisation des surfaces favorables à l'espèce » permettant ainsi « l'augmentation des effectifs » de la population, vers un « nombre d'individus mature compris entre 250 et 1000 » (Grondin & Philippe, 2011). Ce plan a permis de faire le bilan des connaissances sur l'espèce, et de les affiner, en particulier concernant l'effectif de la population, sa répartition en fonction des classes altitudinales, et la préférence des individus en termes d'habitats de nidification (Valette, 2013). Ces premiers résultats semblaient montrer une population reproductrice égale à 150 couples à l'échelle des 140 postes d'observations répartis sur l'île, avec une préférence pour les altitudes en dessous de 1600m, et un habitat de nidification composé principalement de « zones de friche à proximité de patchs arborés » (Valette, 2013). Ce plan de conservation (PDC) a également permis de faire le bilan des menaces qui pèsent sur cette espèce. Protégée depuis 1989, elle était cependant jusqu'en 1966 classée comme vermine. Encore aujourd'hui persécutés, notamment pour la prédation qu'ils exercent sporadiquement sur la « volaille »², les Papangues braconnés ont représenté, entre 1997 et 2009, près de la moitié des 62 individus découverts au sol puis transmis par des citoyens au centre de soin de la faune sauvage géré par la SEOR, ou les individus seront alors recueillis, diagnostiqués et soignés dans la mesure du possible. L'empoisonnement secondaire, du fait de la consommation de rats ayant ingéré des rodenticides, représentait sur cette même période la deuxième cause de rapatriement des individus (24 individus diagnostiqués à la SEOR). Enfin les cas de collisions ont, quant à eux, été représentés par huit Papangues diagnostiqués (Grondin & Philippe, 2011).

Dans la continuité du PDC de 2011, un programme FEDER a été mis en place entre 2016 et 2019, d'un budget de 416 884,83 €, financé par l'Union Européenne, la DEAL Réunion (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), la Région Réunion, EDF

¹ Site internet de l'association : <http://www.seor.fr/>

² En créole réunionnais, désigne les poules, les poussins, etc...

et TEREOS. Porté par la SEOR, ce programme appelé « ECoPap » pour « Écologie et Conservation du Papangue », composé de quatre volets (**Figure 3**), a eu pour objectif d'améliorer les connaissances sur l'écologie de l'espèce afin de pouvoir proposer des mesures de conservation concrètes en réponse aux menaces identifiées par le PDC.

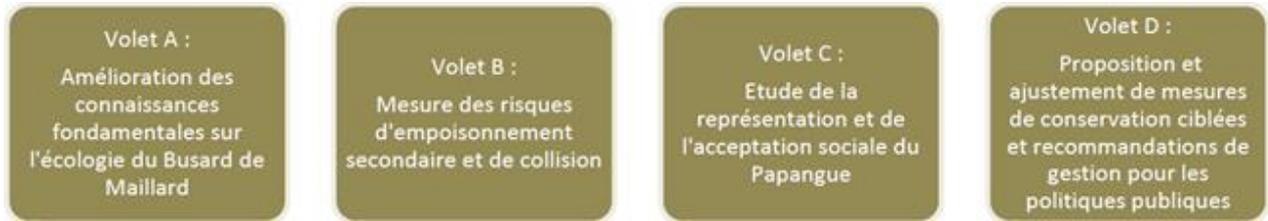


Figure 3 : Les quatre volets du programme « Écologie et Conservation du Papangue ».

Ce stage s'insère dans le Volet A « Amélioration des connaissances fondamentales sur l'écologie du Busard de Maillard », et plus spécifiquement au sein de son action A4 « Sélection et utilisation de l'habitat », dont l'objectif était « d'étudier les critères de sélection des habitats de chasse hors et en période de reproduction ». Les connaissances nouvelles issues de ce programme permettront de protéger l'espèce de façon plus efficace en proposant les mesures de conservation les plus pertinentes possibles. Comme pour d'autres espèces de rapace (Bosch *et al.*, 2010 ; Pfeiffer *et al.*, 2015), la connaissance de la taille des domaines vitaux permettrait de proposer une aire minimale de protection autour de chaque zone de nidification identifiée. De même, la caractérisation des habitats préférentiels serait une première étape, afin d'éviter l'urbanisation de ces habitats fortement utilisés (Real *et al.* 2016, Trierweiler *et al.* 2010), ou l'utilisation de rodenticides (poisons contre les rongeurs), responsables d'empoisonnements secondaires fréquents chez cette espèce (Coeurdassier *et al.*, 2019).

Ce mémoire se base sur les données issues du suivi télémétrique de six Busards de Maillard mâles adultes, dont le recueil est toujours en cours depuis juin 2017. Plus précisément, il s'agira dans ce mémoire : (1) de déterminer la taille des domaines vitaux ; (2) de caractériser la sélection des différents habitats à l'échelle du domaine vital ainsi qu'à l'échelle du paysage, notamment vis-à-vis des infrastructures électriques et routières, et ses variations inter-saisonnières, dans le but fournir des éléments concrets pour la mise en place de mesures de conservation de l'espèce.

1- Matériel et méthodes

1.1. Présentation du site d'étude

La Réunion est une île française du sud-ouest de l'Océan Indien, située à environ 680 km à l'est des côtes malgaches et à 180 km de l'île Maurice, terre émergée la plus proche (**Figure 4**). Volcanique par son origine, ce territoire de 2512 km² possède un relief prononcé abritant une forte proportion d'espèces endémiques (Lagabrielle *et al.*, 2009), et fait partie, au niveau régional, du point chaud de la biodiversité comprenant Madagascar et les îles du sud-ouest de l'Océan Indien (Mittermeier *et al.*, 2011). Ce point chaud accueille plus de 1500 espèces de plantes vasculaires endémiques (Myers *et al.*, 2000), mais comme les 35 autres sur le globe, est caractérisé par une perte de plus de 70% de la surface de sa végétation primaire. Au niveau international, l'identification de ces points chauds permet de prioriser les actions de conservation des espèces (Myers *et al.*, 2000).

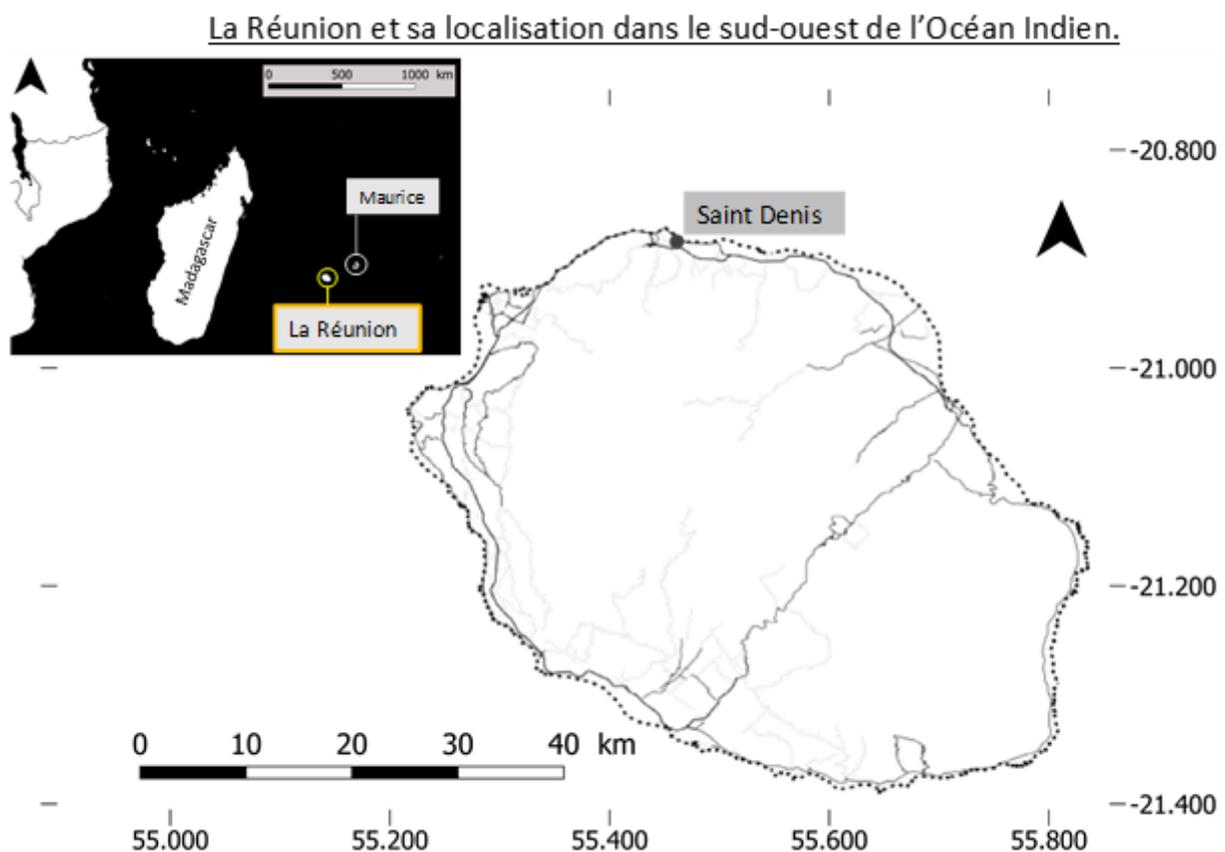


Figure 4: Carte du contour (en pointillés) et des principaux axes de communication (en traits pleins) de l'île de La Réunion, avec sa localisation dans le sud-ouest de l'Océan Indien (source : géoréférencement de cartes du package *ggmap*, v3.0.0, (Kahle & Wickham, 2013)).

Cette biodiversité, depuis la colonisation de l'île à la fin du XVII^{ème} siècle, a grandement diminué, et l'on ne compte plus, parmi les 24 espèces d'oiseaux endémiques vivant sur l'île avant l'arrivée de l'Homme, que sept espèces d'oiseaux terrestres endémiques, en majorité cantonnées aux forêts primaires, et parmi elle, le Papangue (Mourer-Chauviré *et al.*, 1999).

1.2. Capture, pose des GPS-GSM, présentation des individus suivis et des données récoltées

Entre 2017 et 2018, cinq mâles adultes ont été capturés au moyen de pièges mécaniques autonomes “*clapnets*” (**Tableau 1**) disposés de façon opportuniste sur les zones de chasses supposées des Papangues et appâtés à l’aide de leurres. Les pièges se déclenchent lorsque le Papangue descend sur le leurre et entre en contact avec le fil déclencheur du piège. Le sixième individu de l’étude, l’individu X126 (**Tableau 1**), a lui été pris en charge au centre de soin de la SEOR, après avoir été saisi chez un particulier qui le détenait en captivité. L’origine de ces six Papangues est présentée dans la figure ci-dessous (**Figure 5**).**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 1: Résumé des informations concernant le fonctionnement des GPS-GSM pour chacun des six Papangue suivis entre 2017 et 2019 (M : « Male », A : « Adulte »).

Code_individu	Sexe	Age	Début de l’enregistrement	Fin de l’enregistrement	Temps de fonctionnement (en jours)
X602	M	A	16-06-2017	13-09-2018	454
X603	M	A	17-03-2018	01-04-2019	380
X604	M	A	15-03-2018	02-04-2019	383
X941	M	A	13-06-2017	02-04-2019	658
X944	M	A	26-06-2018	01-04-2019	279
X126	M	A	20-03-2019	15-07-2019	117

Origine des individus équipés de GPS-GSM.

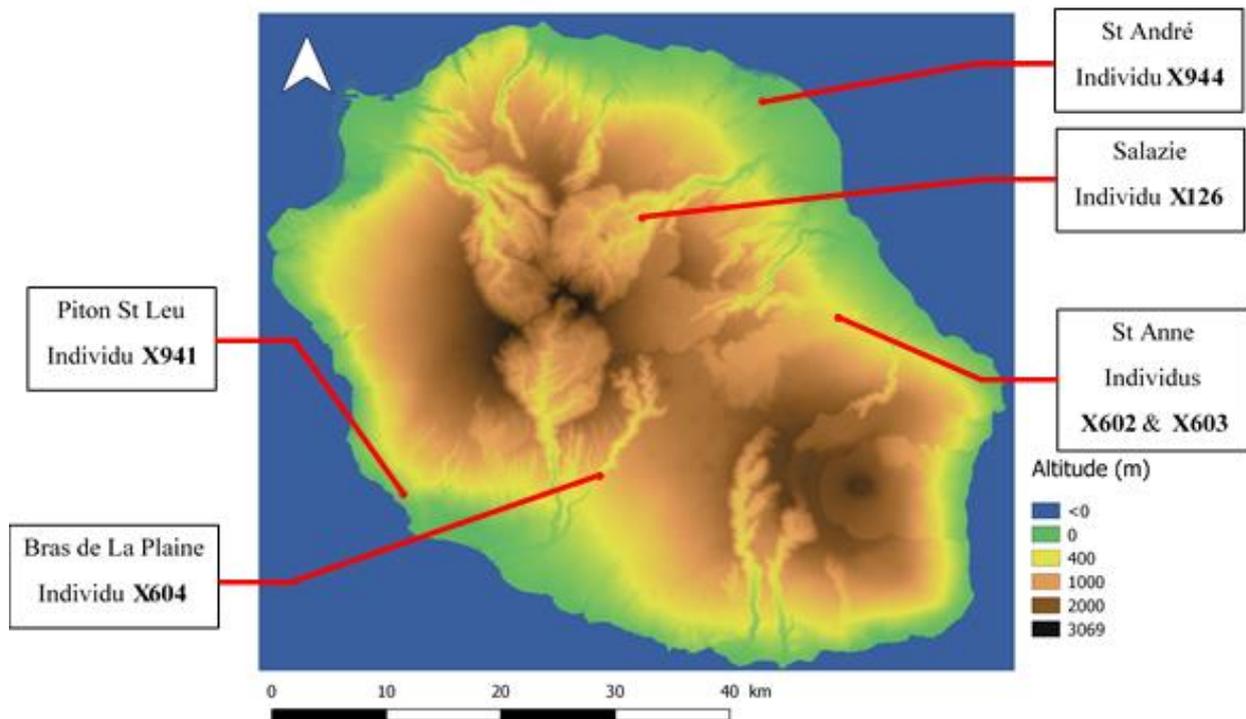


Figure 5 : Carte montrant l'origine des individus équipés de GPS-GSM (source du fond de carte : la BD ALTI ®, au pas de 25m).

Chacun des individus a été équipé d'un GPS-GSM solaire Ornitrack (Ornitela, Estonie), placé sur le dos de l'individu et attaché grâce à un harnais en Teflon (**Figure 6**). Ces appareils permettent d'enregistrer la localisation des oiseaux (dans le système géodésique mondial WGS84), ainsi que, pour chacun de ces localisations (Latitude/Longitude), le nombre de satellites impliqués dans la mesure, et la dilution horizontale de la précision (*hdop*), cette dernière étant un facteur multipliant l'erreur théorique de cinq mètres du GPS-GSM afin d'obtenir l'erreur réelle de position du GPS-GSM. Le recueil des données de ces appareils ne nécessite pas la recapture des individus équipés, et peut être effectué à distance, *via* les réseaux de téléphonie mobile 2G, directement sur ordinateur, à la fréquence souhaitée. Le choix du modèle, et donc du poids, du GPS-GSM à placer, était fait afin de rester sous la limite des 5% du poids de l'animal, une recommandation classique pour les oiseaux (Kenward, 2001).



Figure 6 : Photos d'un Papangue équipé d'un GPS-GSM, avant relâché (l'appareil est indiqué par la flèche rouge) (photo personnelle).

Étant donné que l'intérêt se portait sur l'habitat de chasse du Papangue, plusieurs modifications ont été apportées au jeu de données initial :

- Les localisations aberrantes se situant en mer, tout comme celles de coordonnées nulles, ont été supprimés.
- Le Papangue étant un rapace diurne (Clouet, 1978), seules les localisations GPS pris une heure après le lever du soleil et une heure avant le coucher du soleil ont été conservées, à l'aide de la fonction *sunriset* du package *maptools v0.9-5* (Lewin-Koh & Bivand, 2012), comme cela est réalisé dans d'autres études portant sur l'habitat diurne des oiseaux de proie (Domenech *et al.*, 2015).
- Afin de standardiser les données traitées pour une meilleure estimation des paramètres des modèles (voir ci-dessous) et une meilleure interprétation des résultats (Börger *et al.*, 2006 ; Fieberg, 2007), le pas de temps médian entre chacune des localisations GPS enregistrées a été calculé pour chacun des individus. La valeur maximale de ces pas de temps médian entre

individus (i.e : deux heures) a été choisi pour réaliser un sous échantillonnage des localisations GPS brutes.

En parallèle de ces modifications, et afin d'étudier par la suite les variations inter-saisonniers dans la sélection des habitats, une classification des localisations suivant la saison a été réalisée. La saison de reproduction a été définie comme celle s'étendant de janvier à août, et la saison hors reproduction de septembre à décembre. Bien que pouvant se répartir sur toute l'année, une baisse de l'activité reproductrice est cependant observée entre septembre et décembre (Rey, 2019, Gonin, 2001).

C'est à partir du jeu de données ainsi standardisé que les analyses suivantes ont été réalisées.

1.3- Quantification des domaines vitaux des individus

La méthode de l'Estimation de Noyau de Densité (KDE pour *Kernel Density Estimate*), (Worton, 1989), permet d'estimer la distribution d'utilisation d'un individu (i.e sa distribution dans l'espace), en attribuant à chaque point de l'espace une probabilité de rencontre avec cet individu. Une fonction de noyau bivariée est positionnée au niveau de chacune des localisations GPS enregistrées, puis l'estimation la distribution d'utilisation en un point donné est obtenue en sommant la valeur de chacune des fonctions noyau bivariées au niveau de ce point (**Figure 7**). Sur le schéma ci-dessous, les points bleus représentent les localisations GPS obtenues ; chacune des courbes rouges en pointillés représente une fonction noyau bivariée centrée sur un point ; la courbe bleue représente l'estimation de la distribution de l'utilisation, qui est la somme de chacune des fonctions de noyau bivariée.

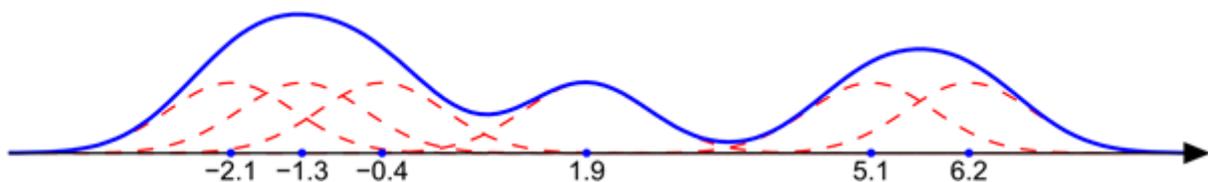


Figure 7 : Représentation sur une dimension d'une Estimation de Noyau de Densité,
Extrait de Contributeur à Wikipédia, Estimation par Noyau [Wikipédia s.d.].

La méthode du KDE est relativement simple à mettre en œuvre, c'est aussi la plus utilisée dans la littérature. Son utilisation permet donc une comparaison des études entre elles (Pfeiffer *et al.* 2015, Real *et al.* 2016, Trierweiler *et al.* 2010).

Un paramètre important de cette fonction est le facteur de lissage, nommé h , déterminant l'aplatissement de la fonction de noyau bivariée au niveau de chaque point. Plus ce facteur h sera grand, plus aplatie sera l'estimation de la distribution d'utilisation. Bien que l'obtention du facteur de lissage par *validation croisée du moindre carré* (LSCV pour *Least Square Cross-Validation*) soit le plus souvent recommandée dans la littérature (Hemson *et al.*, 2005, Laver & Kelly, 2008, Seaman *et al.*, 1999), des problèmes de convergence des modèles pour l'estimer dans notre cas ont conduit à l'utilisation du facteur de lissage de référence noté h_{ref} , ayant tendance au sur-lissage de la distribution de l'utilisation (Hemson *et al.*, 2005, Seaman *et al.*, 1999). Ce sur-lissage aura pour effet d'inclure dans les domaines calculés des zones non fréquentées (Silva *et al.*, 2018), et l'interprétation de résultats se basant sur ces domaines devra donc se faire en conséquence.

L'estimation de la distribution de l'utilisation permet donc d'avoir en chaque point, une valeur assimilable à une probabilité de présence. Il est alors possible de définir une surface minimale comprenant un certain pourcentage de cette distribution d'utilisation.

En vue de l'analyse ultérieure de la sélection de l'habitat, deux types de surfaces occupées ont été définis, en fonction de leurs degrés d'utilisation par l'animal : les 95% de la distribution d'utilisation pour décrire le domaine vital global de l'individu ; les 50% de la distribution d'utilisation pour décrire le domaine de cœur, des pourcentages choisis afin de faciliter la comparaison avec d'autres études sur les rapaces (Bosch *et al.* 2010, Domenech *et al.* 2015, Trierweiler *et al.* 2010). Les calculs des domaines vitaux et domaines de cœur ont par la suite été nécessaires à l'étude de la sélection des habitats et sa variation saisonnière. Ces calculs ont donc été réalisés pour chaque individu et chaque saison de suivi (**Tableau 2**), et ceci grâce au package *adehabitatHR v0.4.16* (Calenge, 2006).

Étant donnée la classification *a priori* du statut reproducteur des individus, et afin de déceler tout changement de domaine vital à la limite entre deux saisons, les trajectoires quotidiennes des individus ont été visualisées. Cette visualisation a été facilitée par l'utilisation du package *plotly v4.9.0* (Sievert *et al.*, 2016). Un changement de domaine vital a été défini par un départ définitif du domaine vital précédent

Tableau 2 : Périodes de suivi pour chacun des six Papangue suivis par GPS-GSM entre 2017 et 2019.

Année	2017		2018		2019	Nombre de domaines calculés
	En reproduction	Hors reproduction	En reproduction	Hors reproduction	En reproduction	
X602						3
X603						3
X604						3
X941						5
X944						3
X126						1

De plus, afin de mieux visualiser graphiquement l'évolution de la surface des domaines vitaux et des domaines de cœur, ceux-ci ont également été calculés mois par mois, en ne prenant en compte que les mois suivis de façon complète.

1.4- Sélection de l'habitat

La sélection de l'habitat a été déterminée à deux niveaux, celui du paysage et celui du domaine vital (Johnson,1980), en comparant l'habitat utilisé, celui se trouvant au niveau du point GPS, à l'habitat disponible, défini différemment suivant le niveau étudié et basé sur la sélection de localisations aléatoires. A ces deux niveaux, deux types de distribution des localisations aléatoires ont été utilisés :

- Une disposition totalement aléatoire des localisations représentant l'habitat disponible :

Pour chaque individu et chaque saison de suivi, un nombre de localisations aléatoires égale à dix fois le nombre de localisations GPS pour cet individu et cette saison a été distribué au sein d'une zone censée représenter l'habitat disponible au niveau du paysage. Une distribution totalement aléatoire des localisations permet de caractériser l'habitat disponible, au niveau du paysage, et suppose donc une disponibilité égale en tous points, c'est-à-dire une occupation homogène hypothétique de l'espace par les individus. Ce nombre de localisations aléatoires a été choisi dix fois supérieur aux localisations GPS afin d'avoir une estimation satisfaisante de l'habitat disponible. Cette zone circulaire avait pour centre le centre d'activité. Ce centre d'activité est défini par les coordonnées du mode des longitudes et du mode des latitudes des localisations GPS enregistrées pour l'individu et une saison donnée, ceci afin d'éviter une distribution multimodale des localisations GPS résultant de temps de suivi long, qui autoriserait l'individu à changer de territoire. Pour chacun des individus et chacune des saisons suivies, le rayon de ce cercle a été défini comme égal au quantile 0.99 de la distribution de la distance des localisations au centre d'activité.

- Une disposition contrainte dans l'espace des localisations représentant l'habitat disponible :

Afin de prendre en compte l'hétérogénéité de la distribution des localisations GPS, c'est-à-dire la disponibilité décroissante des localisations avec la distance par rapport au centre du domaine vital, les localisations aléatoires au niveau du paysage ont été disposées suivant la même distribution que les localisations GPS par rapport au centre du domaine vital, pour chacun des individus et chaque saison de suivi. Pour cela la fonction *density* du package *stats* (chargé au démarrage de R v3.51) a été utilisée afin d'obtenir une approximation de la fonction de densité de probabilité correspondant aux données de distance. Puis un nombre de localisations égal à dix fois le nombre de localisations GPS recueilli (noté n), pour l'individu et la saison donnée, a été généré à partir de la fonction *approx* du même package *stats*. Il en résulte donc $10n$ valeurs de distance par rapport au centre d'activité, et chacune d'entre elles se verra attribuer des coordonnées calculées à partir des coordonnées du centre d'activité. En effet, soit $(x ; y)$ les coordonnées du centre d'activité pour un individu et une saison donnée, les coordonnées $(x_r ; y_r)$ du point situé à une distance r de ce centre peuvent être calculées à

partir de la formule suivante : $x_p = x + r \times \cos(\theta)$; $y_p = y + r \times \sin(\theta)$, où θ est un angle entre 0° et 360° généré aléatoirement.

Avec une distribution contrainte des localisations aléatoires, les localisations représentant l'habitat disponible se retrouvent concentrées au niveau du centre d'activité. Cette concentration aura pour effet de diminuer la valeur du ratio de sélection des habitats présents au niveau du centre d'activité, du fait de l'augmentation apparente de la disponibilité pour ces habitats.

En contrepartie, ce type de distribution rend les habitats plus éloignés du centre d'activité potentiellement plus sélectionnés. Les habitats plus sélectionnés que sous une distribution totalement aléatoire des localisations pourront donc être interprétés comme des habitats que le Papangue « va chercher » à distance de son centre d'activité.

Pour chacune des distributions, le ratio global entre l'ensemble des localisations aléatoires disposées au niveau du paysage et l'ensemble des localisations GPS utilisées est de 9.71. En effet, parmi les localisations distribuées, en nombre dix fois supérieur à celui des localisations GPS, seules celles d'entre elles localisées sur la terre ferme ont été retenues.

Les localisations aléatoires au niveau du domaine vital, ont quant à elles été définies comme les localisations aléatoires disposées au niveau du paysage, positionnées au sein du domaine vital d'un individu pour chaque saison de chaque année de suivi.

Pour chacune des distributions, le ratio global entre l'ensemble des localisations aléatoires au niveau du domaine vital et l'ensemble des localisations GPS utilisées est de 7.77, une proportion plus faible étant donné que seules les localisations aléatoires présentes dans le domaine vital ont été considérées.

Exemple de répartition des points aléatoires

colonnes : types de distribution ; lignes : niveau d'étude

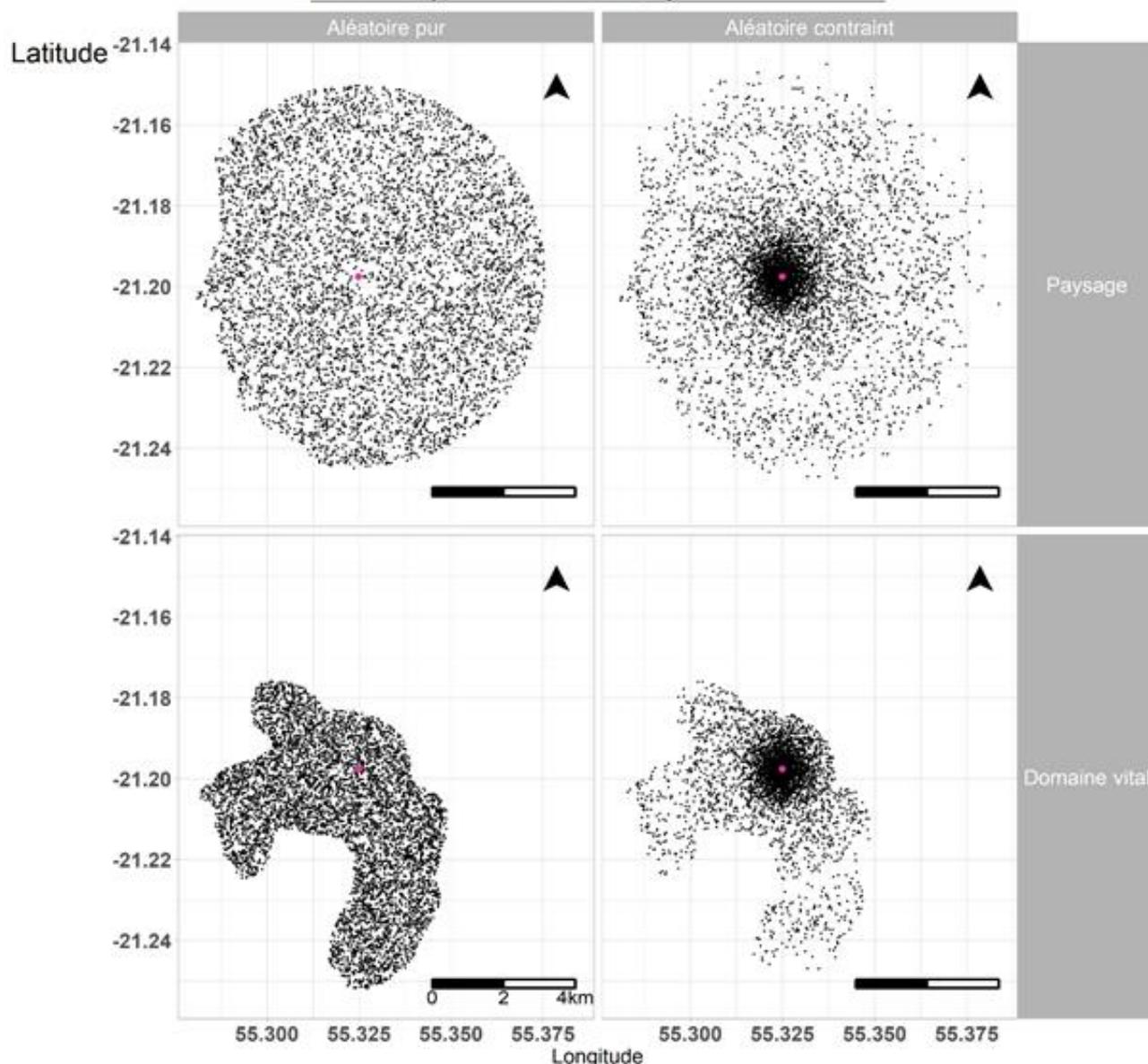


Figure 8 : Répartition des localisations aléatoires, représentant la disponibilité, avec une distribution contrainte ou purement aléatoire, au niveau du domaine vital ou du paysage (exemple avec l'individu X941, en dehors de la période de reproduction de 2017). Le centre d'activité pour cette saison a été représenté en rose.

Les données sur l'habitat secondaire et agricole sont issues de la carte « Base de l'Occupation du Sol » au 1 :25000, conçue par la Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DAAF) en 2012 (DAAF, 2012). Les données sur les habitats primaires sont issues de la carte « Carte des milieux remarquables en 19 thèmes » (Notter *et al.* 2010), au 1 :100 000. Les 19 types de végétations indigènes de cette deuxième carte ont été regroupés sous une seule et même catégorie nommée « Formations primaires ».

Les catégories de la carte « Base de l'Occupation du Sol » ont été reclassifiées de façon à trouver un compromis entre, d'une part, à dire d'experts (Chiron, D., communications personnelles), leur pertinence du point de vue écologique pour le Papangue, et d'autre part, la

représentativité au sein des domaines vitaux de chacune des catégories reclassifiées (**Tableau 3**). La catégorie « Agriculture Diversifiée » regroupe toutes les surfaces agricoles qui ne sont pas destinées à la canne à sucre ou à l'élevage. Elle est composée de deux sous catégories, les « Vergers » (mangues, letchi, longanis, etc...), et les « Cultures basses » (ananas, légumes divers, etc...).

Tableau 3 : Reclassification des catégories d'habitats issues de Chiron,D., Coordinateur du programme Feder ECoPap.

Catégories de la « <u>Carte des milieux remarquables en 19 thèmes</u> » (Notter <i>et al.</i> 2010) ainsi que de la « <u>Base Occupation des Sols</u> » (DREAL, 2012).)	Catégories reclassifiées
Forêt humide	Formations primaires
Forêt semi-sèche	
Forêt de moyenne altitude Au Vent	
Forêt de moyenne altitude Sous le Vent	
Forêt de moyenne altitude de fond de cirque Sous le Vent	
Forêt de montagne Au Vent	
Forêt de montagne Sous le Vent	
Pandanaie	
Tamarinaie	
Végétation d'altitude	
Friche	Formations secondaires basses
Zone humide	
Forêt secondaire	Formations secondaires hautes
Bouquet d'arbres	

Sylviculture	
Végétation de rempart	
Savane	Formations secondaires rases
Sol nu	
Canne	Canne
Agriculture diversifiée	Agriculture diversifiée
Élevage	Élevage
Urbain et périurbain	Urbain et périurbain

La composition de la catégorie « Agriculture diversifiée », la plus hétérogène, peut être résumé par le tableau ci-dessous (**Tableau 4**) :

Tableau 4 : Représentativité globale et composition de la catégorie « Agriculture diversifiée » au deux niveaux d'étude.

	Représentativité de la catégorie « Agriculture diversifiée » parmi l'ensemble des localisations aléatoires disposées	Représentativité de la sous-catégorie « Vergers » au sein de la catégorie « Agriculture diversifiée »	Représentativité de la sous-catégorie « Cultures basses » au sein de la catégorie « Agriculture diversifiée »
Domaine vital	3,7%	39%	61%
Paysage	2,9%	37%	64%

La reclassification effectuée a permis d'estimer de deux façons complémentaires la sélection des habitats. Tout d'abord grâce à un indice élémentaire, le ratio de sélection, puis

par le biais d'une modélisation portant le nom de Fonction de Sélection de la Ressource (RSF pour *Resource Selection Function*) (Manly *et.al*, 2002).

1.4.1- Utilisation du ratio de sélection

Développé par Savage en 1931 (Manly *et.al*, 2002) sous le nom de *forage ratio* (i.e « ratio de recherche de nourriture »), le ratio de sélection d'un habitat est défini ici comme le ratio entre la proportion de localisations GPS et la proportion de localisations disponibles correspondant à cet habitat. La disponibilité ayant été définie au niveau du domaine vital ainsi qu'au niveau du paysage, il en a été de même pour la sélection de la ressource.

La méthode du ratio de sélection, encore utilisée de nos jours (Silva *et al.*, 2018), présente cependant l'inconvénient de ne pas inclure directement de mesure de l'incertitude sur la sélection. C'est pourquoi pour quantifier ces différences, une autre méthode, plus récente, a été utilisée en complément.

1.4.2- Utilisation d'une fonction de sélection de la ressource

Dans un second temps, une Fonction de Sélection de la Ressource a été utilisée (Manly *et.al*, 2002, Boyce & McDonald, 1999). Il s'agit d'une régression logistique, où l'identité des localisations est la variable de réponse, codée par un 0 pour les localisations aléatoires, ou par 1 pour les localisations GPS. L'objectif était d'étudier la sélection en termes d'habitat, mais également la sélection des infrastructures routières et électriques. Les variables explicatives choisies pour les modèles de base ont donc ici été les différentes catégories d'habitats (i.e les différentes valeurs de la variables catégorielle "Végétation"), la distance (en mètres) entre le point à la route la plus proche, ainsi que la distance (en mètres) entre le point et la ligne électrique la plus proche. La variable « pente » (données de la BD ALTI®, au pas de 25m), en pourcent, a été rajoutée au modèle de base afin de voir une éventuelle augmentation de la qualité du modèle sur la base du Critère d'Information d'Akaike (noté par la suite AIC pour *Akaike's Information Criterion*). Si le modèle avec la variable « pente » abaisse l'AIC de plus de deux localisations par rapport au modèle de base, ce sont les résultats de ce modèle qui seront présentés (Burnham & Anderson., 2002).

La modalité de référence choisie (i.e l'*intercept* du modèle logistique) a été la catégorie « Formations primaires », car c'est cette catégorie d'habitat qui était représentée, là où se situent aujourd'hui les domaines vitaux des individus étudiés. L'étude se faisant sur un échantillon restreint de la population totale de Papangues à La Réunion, un modèle linéaire généralisé à effets mixtes, basé sur une distribution binomiale des données, a été utilisé, avec une fonction de lien *logit*, où l'identité des individus est introduite comme un intercept aléatoire. Les modélisations ont été réalisées grâce au package *glmmadmb* v0.8.5 (Bolker *et al.*, 2012).

Comme pour l'étude des ratios de sélection, les fonctions de sélection de la ressource ont été calculées pour chacun des types de distribution des localisations à l'échelle du domaine vital ainsi qu'à l'échelle du paysage (4 jeux de modèles). Le jeu de données a également été découpé en fonction de la saison (« en reproduction » et « hors reproduction ») afin de déceler une éventuelle variation saisonnière dans les valeurs de cette sélection.

Toutes les analyses ont été réalisées sur le logiciel R, version 3.5.1 (2018-07-02). Certaines mises en page cartographiques ont demandé l'utilisation du logiciel QGIS, version 2.18.14.

2- Résultats

Afin de faciliter la lecture des graphiques, des codes ont été utilisés pour chacun des types d'habitats : Formations primaires : « **Fpr** » ; Agriculture diversifiée : « **Agr** » ; Zones liées à l'élevage : « **Ele** » ; Canne à sucre : « **Canne** » ; Formations secondaires hautes : « **FsH** » ; Formations secondaires basses : « **FsB** » ; Formations secondaires rases : « **FsR** » ; Milieux urbains et périurbains : « **Urb** ».

2.1- Quantification des domaines vitaux des individus

La surface des domaines vitaux de cette étude varie entre 2,3 et 55,5 km² (moyenne des 18 domaines vitaux calculés : 4,5 km²) (**Figure 9**). Le pic observé pour l'individu X944 hors période de reproduction en 2018 correspond à une période de transition, où, d'après l'observation des trajectoires journalières, plusieurs allers-retours ont été effectués entre deux sites séparés d'approximativement 11 km, plus particulièrement entre novembre et décembre 2018 (**Figure 10**), augmentant ainsi la surface du domaine vital pour cette période.

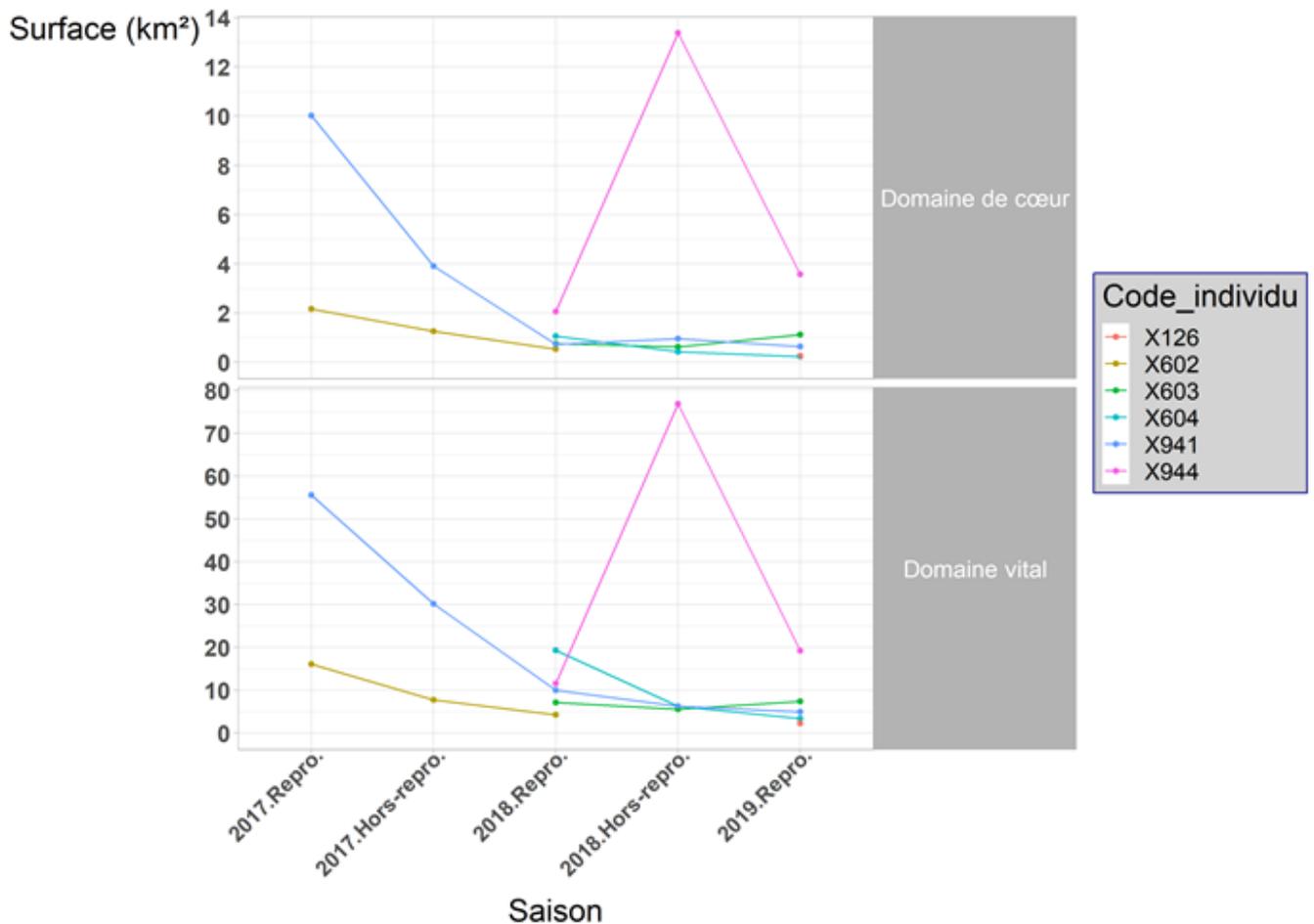


Figure 9 : Surface des domaines de cœur et des domaines vitaux de chacun des six Papangues mâles adultes suivis au cours de cette étude entre 2017 et 2019, pour chaque saison de suivi. (« Repro. » : saison de reproduction, du 1^{er} janvier au 31 août ; « Hors-repro. » : saison hors reproduction, du 1^{er} septembre au 31 décembre).

Les domaines de cœur, au sein desquels les individus passent la moitié de leur temps, suivent les mêmes variations que les domaines vitaux au cours des saisons de suivi, allant de 0,25 à 10km² (moyenne des 18 domaines de cœur calculés : 0,7 km²).

Visualisation du changement de territoire de l'individu X944, entre 2018 et 2019.

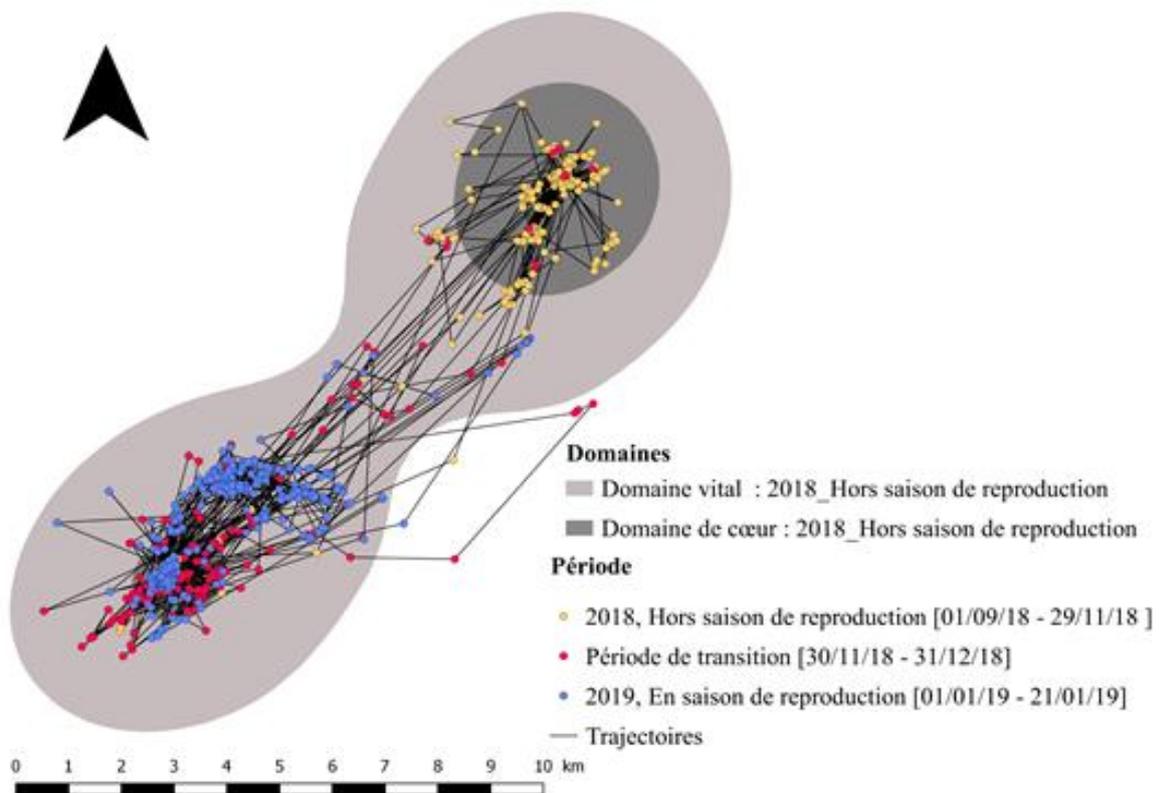


Figure 10 : Visualisation du changement de territoire de l'individu X944, entre 2018 et 2019.

Le calcul, mois après mois, des domaines vitaux (**Figure 11**) et des domaines de cœur (**Figure 12**) fournissent des résultats similaires à ceux des saisons entières. On semble observer une baisse de la taille des domaines entre les saisons de reproduction de 2018 et 2019, notamment pour les individus X941, X603 et X604, mais le faible effectif de la population étudié ne nous permet pas de conclure sur ce point. L'absence de données pour l'individu X602 correspond à la récupération du GPS-GSM de l'individu en janvier 2018 et à la pose d'un autre GPS-GSM en avril 2018.

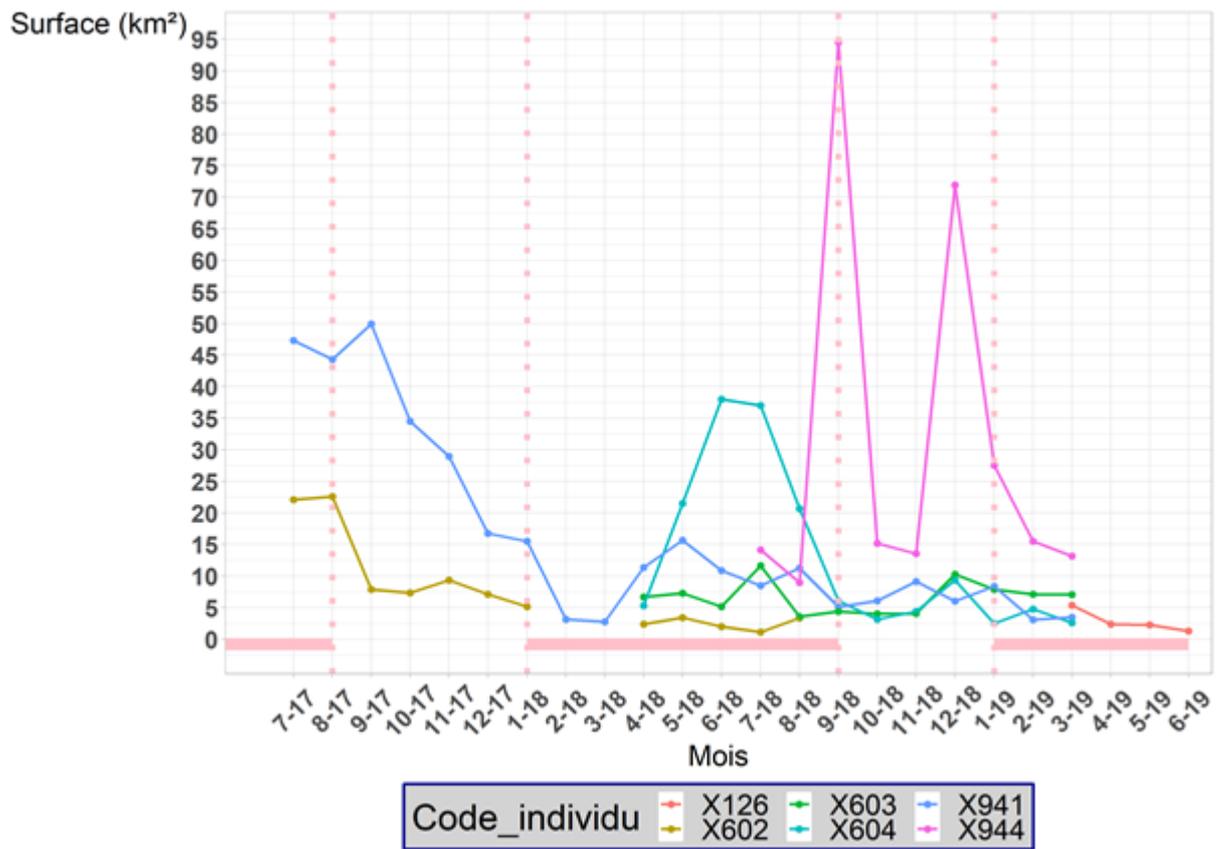


Figure 11 : Évolution mois après mois de la surface des domaines vitaux des six Papangues mâles adultes suivis au cours de cette étude entre 2017 et 2019. Les bandes roses représentent les saisons de reproduction définies *a priori*.

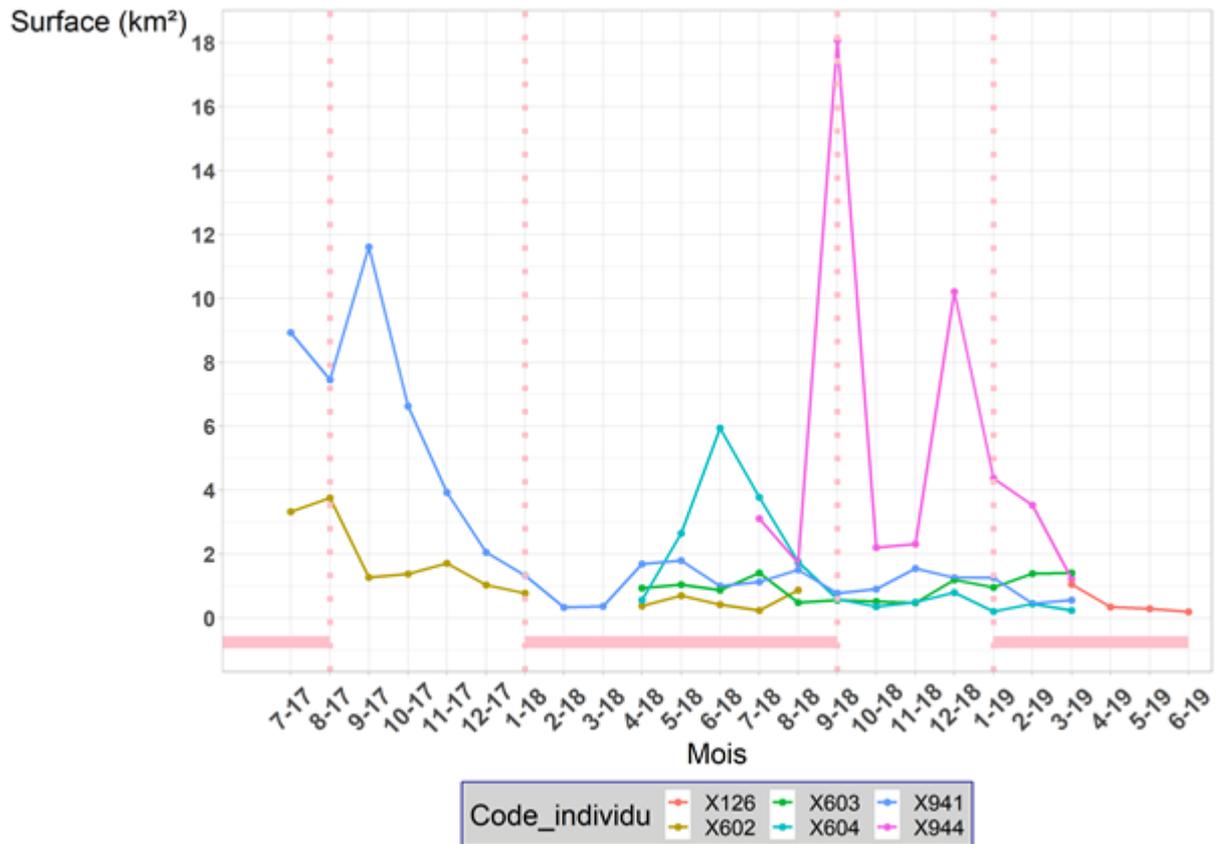


Figure 12 : Évolution mois après mois de la surface des domaines de cœur des six Papangues mâles adultes suivis au cours de cette étude entre 2017 et 2019. Les bandes roses représentent les saisons de reproduction définies *a priori*.

Le calcul des domaines vitaux et des domaines de cœur permet d’identifier les proportions de chaque habitat en leur sein (**Figure 13**). Ceci met en évidence la grande variabilité qui existe en termes d’habitats rencontrés, entre les six individus étudiés. Elle est particulièrement importante pour les proportions de « Formations primaire » et de « Canne », des habitats pour lesquels l’amplitude (écart interquartile) de variation de couverture du paysage va de 0 à 60% et de 0 à 50%, respectivement. En revanche, on observe une variabilité beaucoup plus faible pour les proportions des catégories « Agriculture diversifiée » et les trois catégories de formations secondaires, les « Formations secondaires rases » (i.e ; les savanes et sols nus des fonds de ravines) n’étant pas du tout représentées dans les domaines de cœur. La proportion de la catégorie « Élevage » est, quant à elle, la seule à présenter un écart interquartile près de cinq fois plus important au niveau des domaines de cœur qu’au niveau des domaines vitaux. Ceci pourrait être lié à une variabilité au sein même de cette catégorie “Elevage”, suivant les localités considérées.

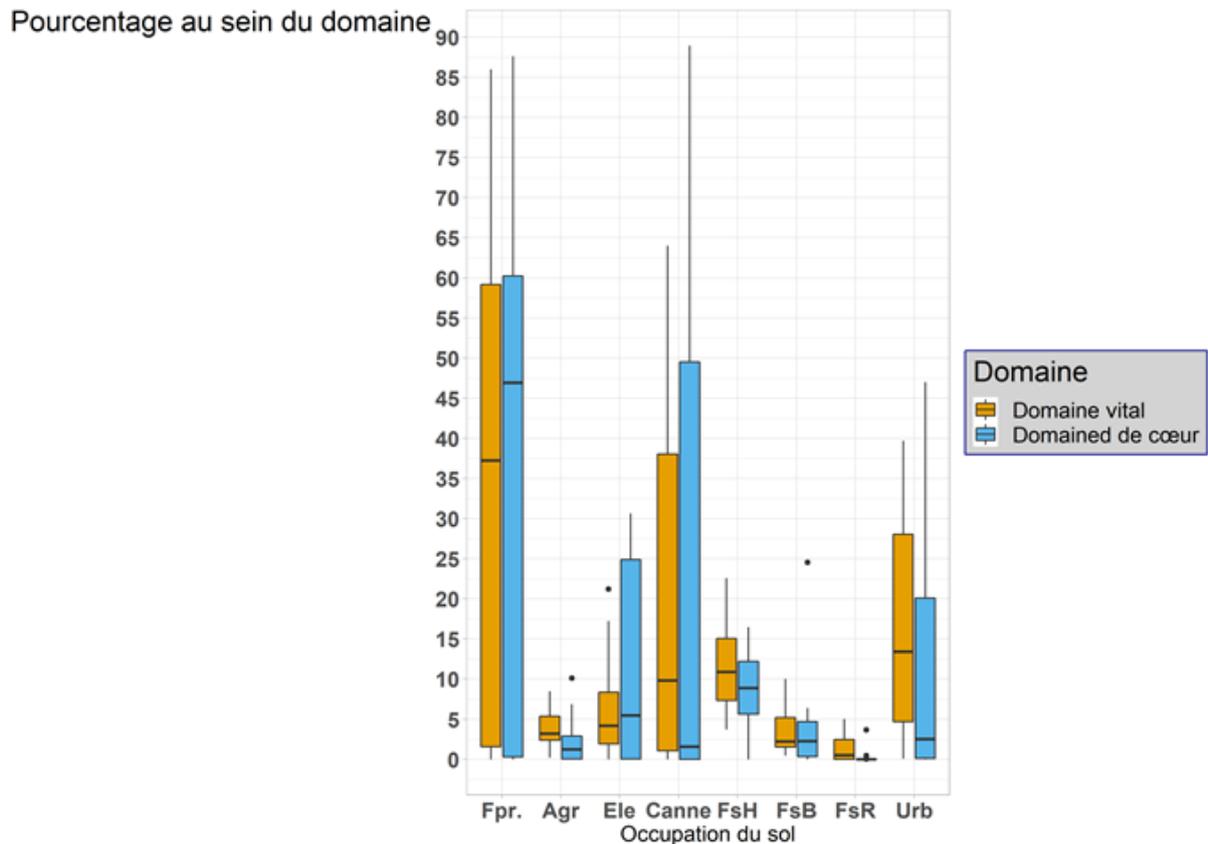


Figure 13 : Représentation des différents habitats dans les domaines vitaux et domaines de cœur calculés pour les six Papangues mâles adultes suivis au cours de cette étude entre 2017 et 2019.

2.2- Étude de la sélection de l’habitat

2.2.1- Utilisation du ratio de sélection

Au niveau du paysage, on remarque tout d’abord la forte sélection de la catégorie “Agriculture diversifiée”, avec une disponibilité uniforme ou contrainte, et ce quelle que soit la saison (**Figure 14**). Les zones liées à l’élevage sont plus fortement sélectionnées au niveau du paysage qu’au niveau du domaine vital, en particulier hors saison de reproduction. Les “Formations primaires” à ce niveau semblent globalement être utilisées en proportion de leur disponibilité, c’est-à-dire qu’elles ne sont ni évitées, ni sélectionnées. Comme attendu, la catégorie “Milieux urbains et périurbains” est celle qui est la plus évitée, quel que soit le niveau d’étude ou la définition de la disponibilité.

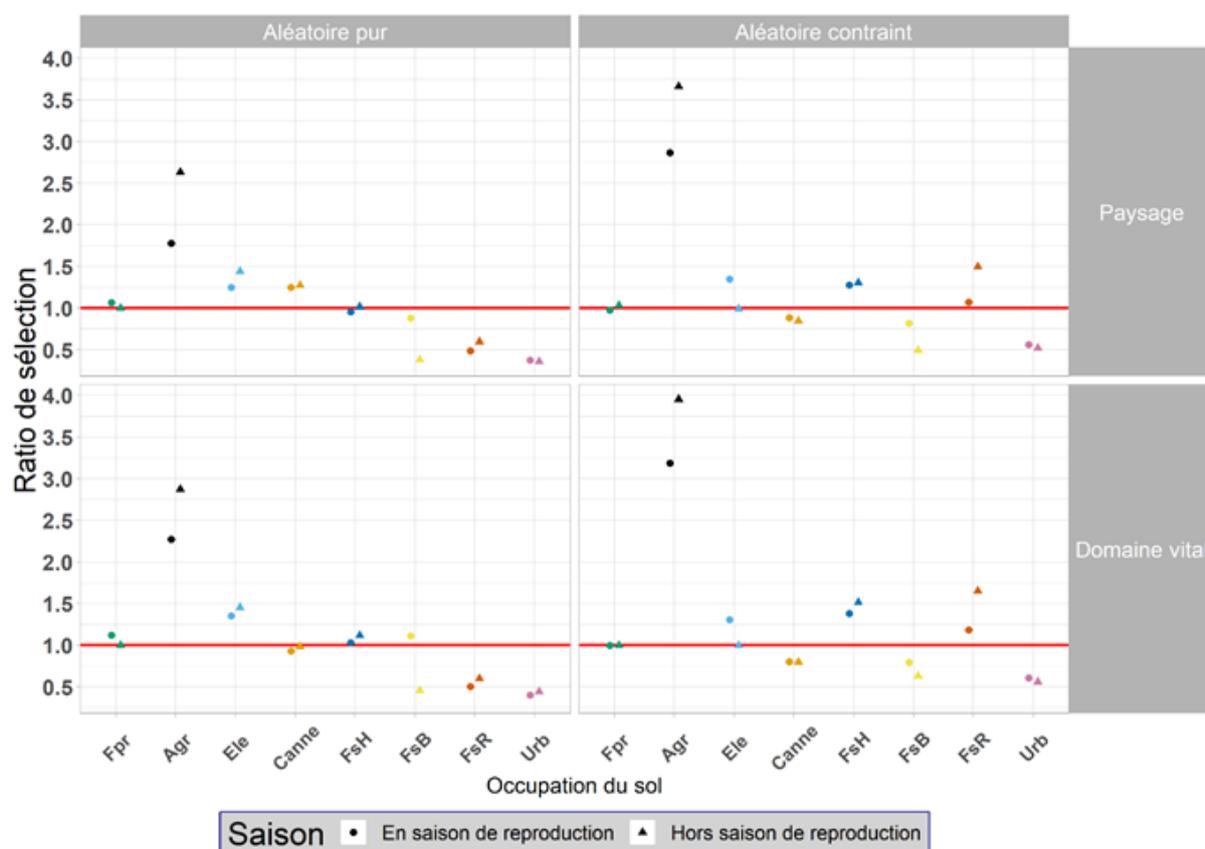


Figure 14: Valeur des ratios de sélection des habitats considérés, pour chacun des niveaux d'étude et chacun des types de distribution, des six Papangues mâles adultes suivis au cours de cette étude entre 2017 et 2019.

Les résultats au niveau du domaine vital (**Figure 14**) montrent qu'il existe une grande similitude des ratios de sélection, aux deux niveaux d'étude (paysage ou domaine vital), pour une même distribution des localisations aléatoires (aléatoire pur ou contraint par le centre d'activité). On obtient en effet sensiblement les mêmes ratios de sélection au niveau du domaine vital qu'au niveau du paysage.

Ce que l'on retrouve cependant au deux niveaux d'étude ainsi que pour les deux types de distribution des localisations aléatoires, c'est un ratio de sélection des « Formations primaire » très proche de 1, ce qui confirme la pertinence de son utilisation comme habitat de référence dans les fonctions de sélection de la ressource. La catégorie « Agriculture Diversifiée » semble être la plus sélectionnée d'entre toutes, avec une utilisation deux à quatre fois plus importante qu'une utilisation proportionnelle.

Ces ratios de sélection ont permis de quantifier, dans l'absolu, la sélection des différentes catégories d'habitats en fonction de leur disponibilité. Les fonctions de sélection de la ressource, quant à elles, donnent une estimation réputée plus précise de la sélection, pouvant prendre en compte des prédicteurs continus, avec une erreur associée, et cela par rapport à un habitat de référence.

2.2.2- Utilisation d'une fonction de sélection de la ressource

L'habitat de référence étant les « Formations primaires » pour les modèles suivants, les coefficients issus des modèles, assimilables à des odd ratios, s'interpréteront par rapport à cette référence. Pour chacun des habitats, une valeur d'odd ratio égale à un signifie que l'habitat est utilisé en proportion égale à sa disponibilité, une valeur inférieure à un signifie que l'habitat est moins utilisé que ce que l'on pourrait attendre d'une utilisation proportionnelle à la disponibilité. Une valeur d'odd ratio supérieure à un pour un habitat donné est par conséquent interprétée comme une sélection de cet habitat par rapport aux « Formations primaires ». Cependant les ratios de sélection présentés précédemment ont montré que les « Formations primaires » sont utilisées en proportion de leur disponibilité. Un habitat ayant une valeur d'odd ratio égale à un pourra donc également être considéré comme utilisé en proportion de sa disponibilité. Sans précision, les résultats sont donnés pour une distribution contrainte des points aléatoires, la plus proche de la réalité ; la distribution homogène de ces points aléatoires servant uniquement de comparaison avec une accessibilité homogène théorique de la ressource. Pour chacun des graphiques, les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95% de chacun des odd ratios estimés.

Chacun des 8 modèles est caractérisé par : son niveau d'étude ($n=2$), le type de distribution des localisations aléatoire ($n=2$), et la saison ($n=2$). Les écarts en termes d'AIC entre ces huit modèles de base (avec les types d'habitats, la distance aux lignes électriques et la distance aux routes) et les huit modèles comprenant également la variable « pente », sont tous supérieurs à 119.

L'ajout de la variable "pente" améliorant la qualité de chacun des huit modèles d'au moins 119 points, cette variable fait donc partie des modèles présentés par la suite.

Les intervalles de confiances, calculés par le modèle, nous renseignent ici sur la significativité de la sélection ou de l'évitement de chacun des habitats, par rapport à l'habitat de référence « Formations primaires ». Comme pour l'étude des ratios de sélection, les résultats seront présentés d'abord au niveau du paysage, puis au niveau du domaine vital.

Au niveau du paysage (**Figure 15**), la catégorie « Agriculture diversifiée » est sélectionnée toute l'année, et de façon significativement plus importante en dehors de la saison de reproduction. La nette différence entre les deux types de distribution des localisations aléatoires (aléatoire pur *et* aléatoire contraint) montre que cet habitat est recherché en périphérie du centre d'activité, avec une utilisation deux à quatre fois supérieure à sa disponibilité.

Cette sélection est également visible pour les zones liées à l'élevage. On observe que cette catégorie est recherchée à l'échelle du paysage, à l'inverse de la précédente, en saison de reproduction, alors qu'elle l'est significativement moins en dehors de la période de reproduction.

Les champs de canne semblent plus évités en périphérie du centre d'activité en saison de reproduction. Cet habitat est utilisé en proportion de sa disponibilité le reste de l'année.

Les résultats concernant les « Formations secondaires hautes » montrent une sélection faible mais nette de cette catégorie en périphérie du centre d'activité, alors qu'elle semble évitée si l'on considère une disponibilité de la ressource homogène au niveau du paysage.

Contrairement à ce qui était attendu de par les résultats des ratios de sélection on n'observe, pour la catégorie « Formations secondaires basses », qu'une différence minimale en termes d'odd ratio entre les types de distribution des localisations aléatoires. Bien que la valeur des odd ratios soit plus grande en saison de reproduction, comme on pourrait s'y attendre pour une espèce nichant préférentiellement dans ces habitats, les « Formations secondaires basses » apparaissent cependant comme évitées, quelle que soit la saison.

Les « Formations secondaires rases » semblent elles plus évitées, ou moins sélectionnées, en saison de reproduction que le reste de l'année et la différence observée entre les deux types de distribution des localisations aléatoires montre, là encore, une sélection en périphérie du centre d'activité.

Comme attendu, les milieux urbains et périurbains sont largement évités, avec une utilisation deux fois plus faible qu'en proportion de sa disponibilité, quelle que soit la saison.

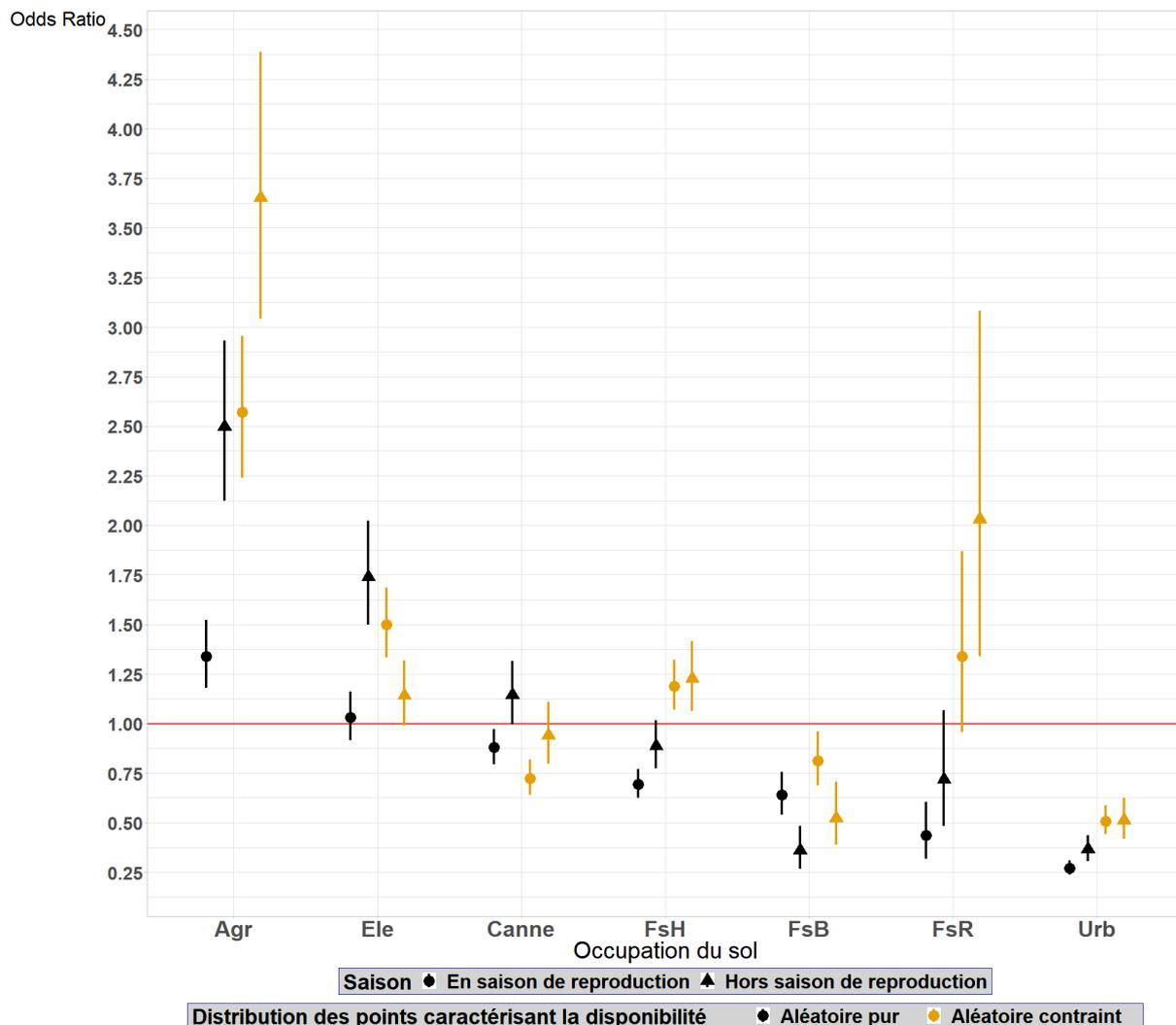


Figure 15 : Comparaison des résultats des Fonctions de Sélection de la Ressource au niveau du paysage, pour les deux types de distribution des localisations aléatoires.

Au niveau du domaine vital (**Figure 16**), on observe des résultats extrêmement similaires à ceux obtenus aux niveaux du paysage, avec cependant quelques différences notables. L'évitement de la catégorie « Canne » est nettement plus visible à ce niveau d'étude, en particulier lors de la saison de reproduction. A l'inverse, les « Formations secondaires basses » tendent, à ce niveau d'étude, à ne plus être évitées, et à être utilisées en proportion de leur disponibilité. Pour les « Formations secondaires rases », on note une différence plus nette entre une disponibilité homogène et une disponibilité contrainte de la ressource, montrant qu'à ce niveau d'étude, cette catégorie est recherchée plutôt en périphérie éloignée du centre d'activité.

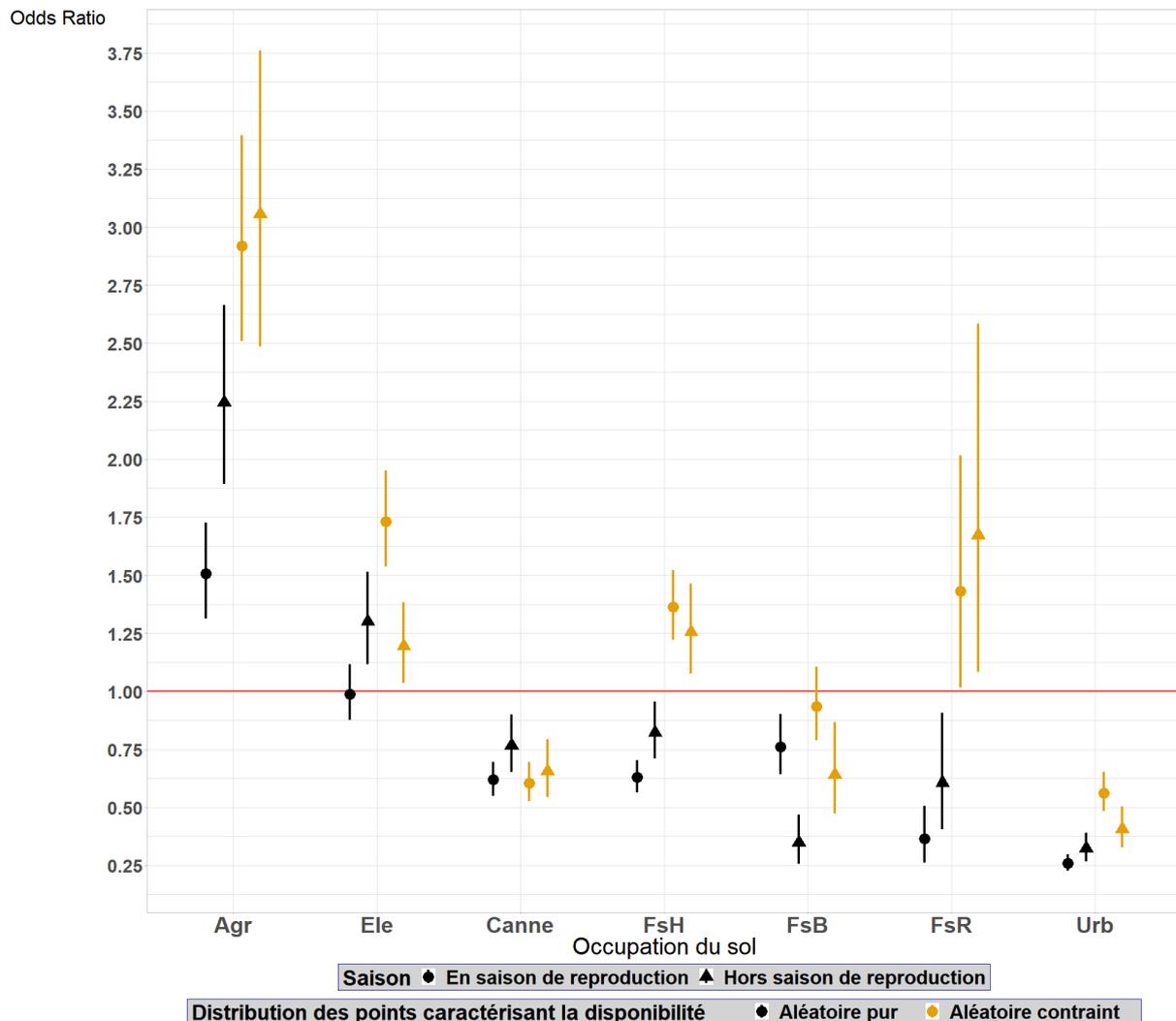


Figure 16 : Comparaison des résultats des Fonctions de Sélection de la Ressource au niveau du domaine vital, pour les deux types de distribution des localisations aléatoires.

Ces résultats montrent globalement une utilisation de l'habitat par le Papangue différente de sa disponibilité. C'est également ce que l'on observe pour la variable « pente » (**Figure 17**). Cette variable est sélectionnée à tous les niveaux d'étude et en toutes saisons. De plus, les valeurs de cette sélection sont en effet significativement plus importantes pour une même saison, au niveau du paysage qu'au niveau du domaine vital.

On observe également que cette variable est significativement moins sélectionnée durant la saison de reproduction, pour un même niveau d'étude et un même type de distribution des

localisations aléatoires. La comparaison des deux types de distributions des localisations aléatoires permet de voir une sélection significativement plus faible dans le cas d'une distribution contrainte de ces localisations aléatoires, signe que cette variable est plutôt sélectionnée au niveau du centre d'activité. Cette différence n'est cependant pas présente en dehors de la saison de reproduction au niveau du domaine vital.

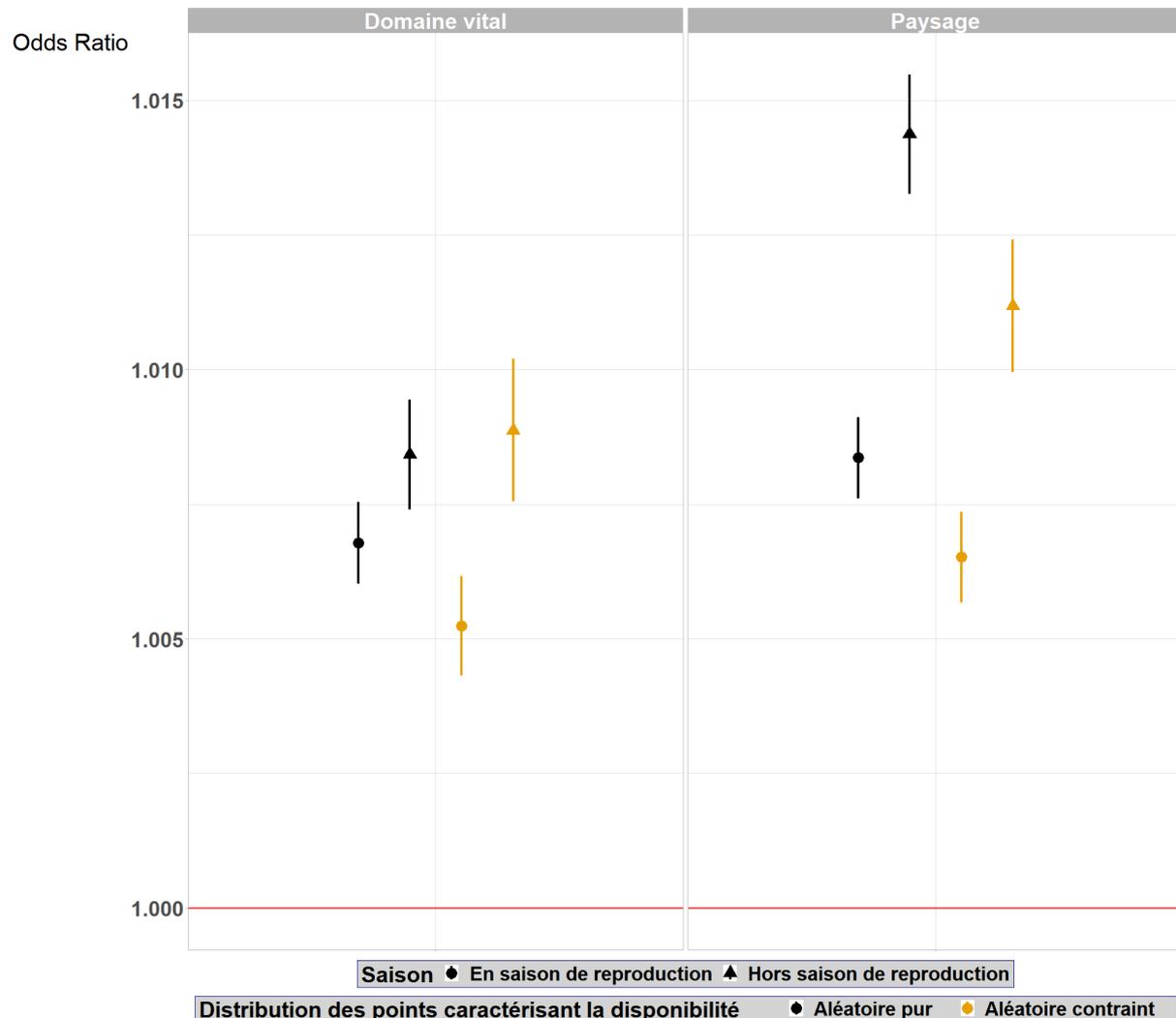


Figure 17 : Comparaison des résultats des Fonctions de Sélection de la Ressource pour la variable "pente", aux deux niveaux d'étude, pour les deux types de distribution des localisations aléatoires.

Deux autres variables continues ont été incluses dans les modèles : la distance aux lignes électriques ainsi que la distance aux infrastructures routières. Une attention est à porter sur l'interprétation des odd ratios en termes de sélection. En effet, un odd ratio supérieur à un signifie une sélection des fortes distances au type d'infrastructure considéré, et par conséquent un évitement de l'infrastructure (**Figure 18**).

Les lignes électriques ne font l'objet d'un évitement faible mais sensible qu'en considérant une disponibilité homogène, au niveau du paysage. Avec ce même type de disponibilité, cette différence n'est plus perceptible au niveau du domaine vital. En considérant une disponibilité de la ressource contrainte par la position du centre d'activité, on remarque une forte différence saisonnière dans la sélection, encore plus prononcée au niveau du domaine vital. En effet on

voit une nette sélection des infrastructures électriques en saison de reproduction, alors qu’elles sont évitées en dehors de la saison de reproduction. Les différences de sélection entre les deux types de disponibilité montrent que le centre d’activité des individus est plus éloigné des infrastructures électriques pendant la saison de reproduction qu’en dehors de cette saison.

Les infrastructures routières présentent, quant à elle, une différence notable de sélection suivant le niveau d’étude. Sélectionnées au niveau du paysage, ces infrastructures s’avèrent visiblement évitées au niveau du domaine vital, uniquement en saison de reproduction. Les différences significatives observées entre les deux types de disponibilités montrent que ces infrastructures routières sont présentes au niveau du centre d’activité.

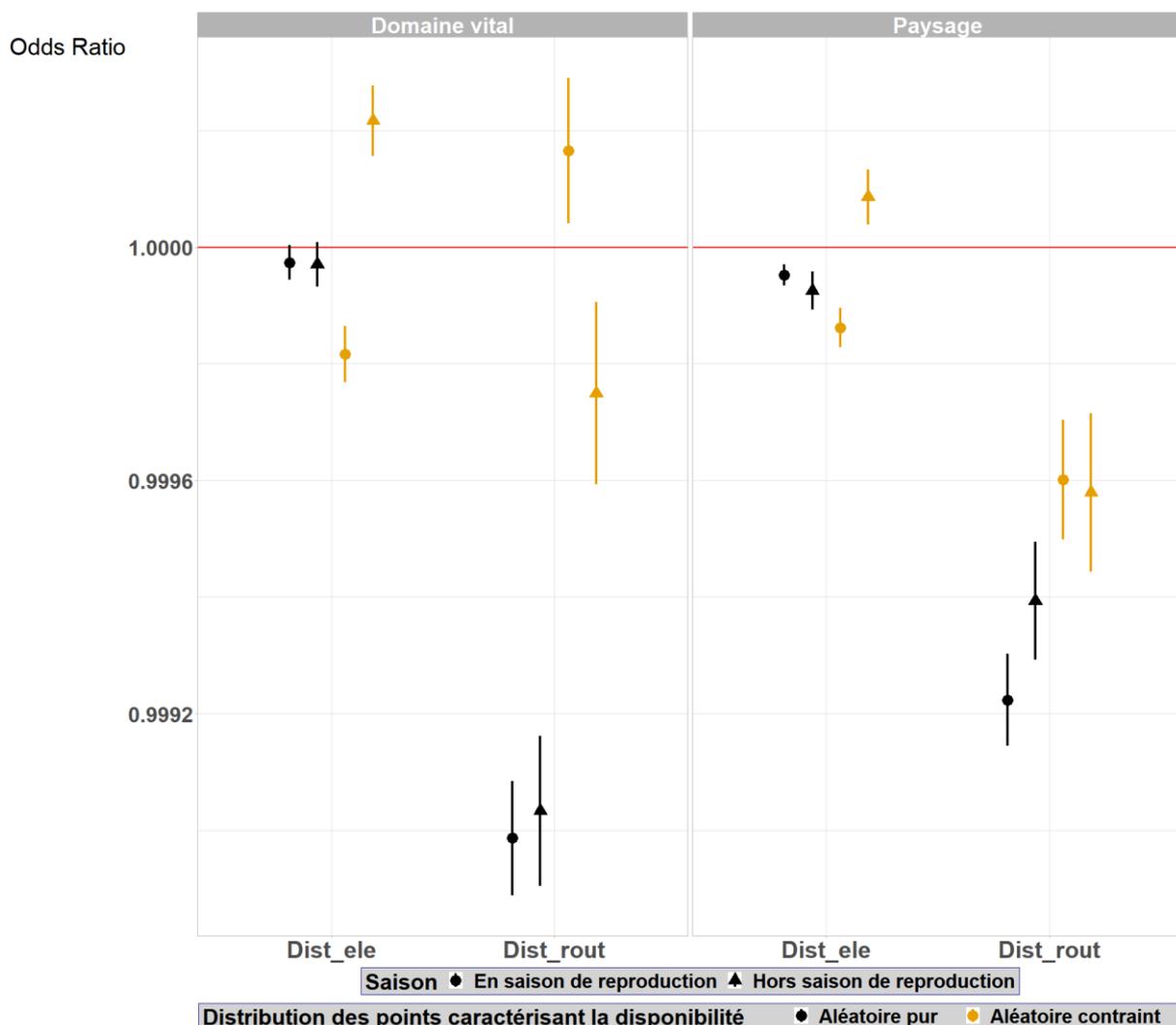


Figure 18 : Comparaison des résultats des Fonctions de Sélection de la Ressource pour les variables de distance aux infrastructures, aux deux niveaux d’étude, pour les deux types de distribution des localisations aléatoires. (“Dist_ele” : distance aux lignes électriques ; “Dist_rout” : distance aux routes).

Ces résultats apportent de nouvelles pistes pour mieux comprendre l’écologie de l’espèce, mais il convient de les mettre en regard avec d’autres études sur le sujet afin de les interpréter au mieux.

3- Discussion

Les résultats précédents montrent que le Papangue, *Circus maillardi*, présente une forte variabilité dans la taille de ces domaines vitaux, et utilise les composantes de son environnement de façon sélective.

3.1- Quantification des domaines vitaux des individus

Peu d'informations sont disponibles sur la taille des domaines vitaux des espèces du genre *Circus*, et sur ceux de *Circus maillardi* en particulier. La taille estimée « d'environ 3km² » des domaines vitaux, issue des observations de Clouet en 1978, apparaît sous-estimée au regard des résultats obtenus dans le cadre de cette étude, avec des valeurs comprises entre 2,3 et 55,5 km². Il faut néanmoins rappeler que l'estimation de la taille de domaines vitaux par la méthode du KDE intégrant un facteur de lissage de référence (h_{ref}) a tendance à donner des valeurs plus grandes qu'avec d'autres méthodes d'estimation. Cependant, l'utilisation de donnée GPS nous permet dans ce cas précis d'obtenir une estimation plus fiable que les estimations visuelles de Clouet. Les données de densité de population disponibles pour *Circus spilothorax*, une espèce proche de *Circus maillardi* et appartenant, elle aussi, au groupe des « Busards des marais » (*Marsh Harriers*) (Oatley *et al.*, 2015), donnent une estimation plus proche des résultats obtenus, avec une surface par individu comprise entre 14 et 22 km² (Simmons & Legras, 2009). L'espèce *Circus pygargus*, appartenant au groupe des « Busards des steppes » (*Steppes Harriers*) (Oatley *et al.*, 2015), est la seule du genre *Circus* dont les domaines vitaux ont été étudiés par radio télémétrie, et ce aux Pays-Bas (Trierweiler, 2010). Cette étude, qui se basait également sur la méthode du KDE avec un facteur de lissage de référence, montrait pour *C. pygargus* une surface des 90% d'utilisation égale à 34,9± 3,8 km², et une surface des 100% d'utilisation égale à 131,1±13,9 km². Outre le fait qu'il ne s'agisse pas de la même espèce et de la même méthode d'échantillonnage des données, les surfaces plus importantes obtenues dans l'étude de Trierweiler pourraient en partie s'expliquer par une disponibilité des proies plus faible que dans le contexte tropical insulaire de l'île de La Réunion, mais l'absence de territorialité apparente de *C. maillardi* (Grondin & Philippe 2011) aurait plutôt tendance à produire des domaines vitaux de taille plus importante que pour une espèce territoriale, comme cela a été avancé chez *C. cyaneus* (Temeles, 1987).

La forte hétérogénéité des domaines, au regard des habitats qui les composent, tend à confirmer le caractère généraliste de *Circus maillardi*. Elle pourrait également être liée à la superficie et au fort relief de l'île de La Réunion, qui restreignent l'ensemble des activités humaines aux zones planes, généralement à basses altitudes.

Grâce à ces valeurs de surface des domaines, et en supposant que le centre d'activité est assimilable à la localisation d'un nid, par des observations de terrain, permettrait de déterminer l'étendue d'une zone où prioriser les actions de conservations.

3.2- Étude de la sélection de l'habitat

Comme cela a été souligné par les études précédentes (Bretagnolle *et al.*, 2000, Ghestemme *et al.*, 1998), *C. maillardi* a su s'adapter à la dégradation et la modification des habitats indigènes par l'Homme, en tirant parti des zones de culture et d'élevage en particulier, comme le montrent les résultats de cette étude. Cette adaptation atteste de la forte plasticité de

l'espèce en termes d'habitat, et pourrait n'être qu'un retour à l'utilisation d'habitats ouverts (Grondin & Philippe 2011), que sélectionnait l'espèce mère *C. macroscelus* (René de Roland *et al.*, 2009) avant son arrivée à La Réunion. En effet *C. maillardi* présente de par sa morphologie un début d'adaptation à la chasse en milieu arboré, avec des tarses plus longs et des ailes plus courtes et rondes, par rapport à *C. macroscelus* (Grondin & Philippe 2011), qui lui chasse plutôt en milieu ouvert (René de Roland *et al.*, 2004). La dépendance envers les zones humides que montrent les différents membres du groupe des « Busards des marais » comme *C. macroscelus* (René de Roland *et al.*, 2004) ou *C. spilothorax* (Simmons & Legra, 2009), n'est plus présente chez *C. maillardi*, et cela peut être de par la faible représentativité, par rapport aux forêts, de zones relativement ouvertes et humides, avant même la colonisation de l'île par l'Homme.

Tableau 5 : Synthèse des principaux résultats de l'étude de la sélection de l'habitat de six Papangues mâles adultes, entre 2017 et 2019 (R : « en reproduction », Hr : « hors reproduction »).

Type de distribution des localisations aléatoires	Distribution purement aléatoire des localisations				Distribution aléatoire contrainte des localisations				Interprétation principale
	Paysage		Domaine vital		Paysage		Domaine vital		
	R	Hr	R	Hr	R	Hr	R	Hr	
Niveau d'étude									
Saison Variables	R	Hr	R	Hr	R	Hr	R	Hr	
Agriculture diversifiée	+	++	+	++	++	++	++	++	Habitat le plus sélectionné, en particulier hors reproduction.
Élevage	∅	+	+	+	+	∅	+	+	Habitat sélectionné, en particulier en reproduction.
Canne	-	∅	-	∅	-	∅	-	-	Habitat non sélectionné, évité en reproduction.
Formations secondaires hautes	-	∅	-	∅	+	+	+	+	Habitat sélectionné, en périphérie du centre d'activité.
Formations secondaires	-	-	∅	+	-	-	∅	∅	Habitat moins utilisé qu'en proportion de sa

basses									disponibilité.
Formations secondaires rases	-	∅	-	-	∅	+	+	+	Habitat sélectionné, mais faiblement représenté.
Urbain et périurbain	-	-	-	-	-	-	-	-	Habitat le plus évité.
Pente	+	++	+	+	+	++	+	+	Particulièrement sélectionnée, hors reproduction.
Distance aux lignes électriques	+	+	∅	∅	+	-	+	-	Centre d'activité plus éloigné des infrastructures électriques en reproduction.
Distances aux routes	+	+	++	++	+	+	-	+	Infrastructures routières sélectionnées au niveau du paysage, évitées au niveau du domaine vital en reproduction.

- **code-symbole** de la valeur des odd ratios pour les **catégories d'habitats** : ++ : significativement supérieure à deux ; + : inférieure à deux mais significativement supérieure à un ; ∅ : pas significativement différente de 1 ; - : significativement inférieure à un
- **code-symbole** de la valeur des odd ratios la **variable pente** : ++ : significativement supérieure à 1,010, + : significativement supérieure à 1,000
- **code-symbole** de la valeur des odd ratios des **variables de distance** : ++ : significativement inférieure à 0,9992 ; + : significativement inférieure à 1,000 ; ∅ : pas significativement différente de 1,000 ; - : significativement supérieure à 1,000

La comparaison entre les résultats des fonctions de sélection de la ressource, obtenues avec différents types de distribution des localisations aléatoires, permet de caractériser indirectement l'habitat présent au niveau du centre d'activité. Cette comparaison entre une disponibilité homogène de la ressource et une disponibilité contrainte par un centre d'activité suggère que la catégorie "Agriculture Diversifiée", les "Formations secondaires hautes," ainsi

que les “Formations secondaires rases” soient effectivement celles “recherchées” par le Papangue en périphérie de son centre d’activité (**Tableau 5**). Néanmoins les valeurs pour la catégorie “Formations secondaires rases” sont à considérer avec prudence du fait des faibles surfaces de ces habitats dans les domaines vitaux (**Figure 13**). En considérant que la distribution contrainte représente le mieux la disponibilité de la ressource, l’habitat présentant une différence significativement plus forte durant la période de reproduction se trouve être les zones liées à l’élevage, aussi bien au niveau du paysage qu’au niveau du domaine vital. Le fait que ces zones de végétation rase, d’agriculture diversifiée et d’élevage soient relativement ouvertes doit probablement jouer en faveur de leur sélection, de par la facilité de capture des proies, comme c’est le cas de façon générale pour les oiseaux de proies (Real *et al.*, 2016).

De par la forte sélection de ces types d’habitats agricoles, et l’évitement notable de la catégorie « Urbain et périurbain », il semble nécessaire de conserver les surfaces de ces habitats, de les préserver du mitage agricole, notamment dans un contexte de forte densité de population humaine (341 habitants/km² en 2016, contre 105 en Métropole) couplé à une augmentation de la population de 0,6% par an entre 2009 et 2018, contre +0,4% par an sur la même période en Métropole (Institut national de la statistique et des sciences économiques, 2019).

Les niveaux d’expositions aux empoisonnements secondaires dus aux rodenticides (poison destiné à tuer les rongeurs), sont très importants chez cette espèce (Coeurdassier *et al.*, 2019), ces empoisonnements représentant une menace particulièrement lors de l’élevage des jeunes, pour la survie des oiseaux et leur capacité d’investissement dans la reproduction la population. Il pourrait donc être judicieux de « cibler ces zones prioritaires pour accentuer la sensibilisation du monde agricole », et ainsi prioriser sur ces zones l’adoption de « bonnes pratiques » de lutte, comme suggéré dans le Plan de Conservation (Grondin & Philippe, 2011), en particulier pendant la saison de reproduction.

La sélection nette de la pente pourrait être liée à des dérangements d’origine anthropique moins importants lorsque la pente du terrain augmente. Cette sélection est également à mettre en lien avec la présence sur ces pentes des « Formations secondaires hautes », caractéristiques des flancs de ravines, mais pourrait également se traduire par un évitement des faibles pentes, de par l’urbanisation plus importante qu’elles présentent. Cependant, les résultats de cette étude montrent une baisse significative de la sélection de la pente, quel que soit le niveau d’étude, en saison de reproduction, contrairement aux résultats antérieurs sur l’espèce (Grondin & Philippe 2011). La sélection plus faible des pentes pourrait être liée au type de proies recherchés, en saison de reproduction, dans des milieux où ces proies sont plus abondantes, voir plus facile à capturer.

Concernant les infrastructures anthropiques, les résultats montrent une sélection pour les infrastructures routières ainsi que pour les lignes électriques, ces dernières étant significativement moins sélectionnées que les routes. La piste la plus probable pour expliquer cette sélection des infrastructures anthropiques pourrait être la présence, au niveau de ces infrastructures, de proies elles-mêmes victimes de collisions (Eccleston & Harness, 2018), ou d’un habitat lui aussi favorable à l’espèce et à ses proies. Enfin les bords de routes sont susceptibles d’être plus régulièrement entretenus que les alentours des lignes électriques, favorisant une végétation plus basse de part et d’autre des routes, où la capture des proies est plus aisée.

La modélisation du risque de collision avec les lignes électriques chez *Hieraaetus fasciatus* a permis de montrer que ce risque se trouve accru à des niveaux d’étude plus réduits (le

domaine de cœur) par rapport à des niveaux d'étude plus large (le domaine vital) (Rollan *et al.*, 2010), ce que ne semble pas montrer, dans l'étude présentée ici, l'absence de différence significative entre la sélection des lignes électriques au niveau du paysage et au niveau du domaine vital. Cette absence d'évitement des infrastructures incite à la prudence quant aux risques de collisions qu'elles peuvent représenter, et l'on pourrait proposer, en termes de gestion, le marquage préventif des lignes électriques afin d'augmenter leur visibilité, ou au contraire l'enterrement de ces lignes électriques afin d'éliminer à la fin le risque de collision et le risque d'électrocution (Eccleston & Harness, 2018).

3.3- Perspectives de l'étude

Les données recueillies par les GPS-GSM ont permis de déterminer la surface requise pour un individu mâle adulte ainsi que les habitats sélectionnés par ces mêmes types d'individus.

Afin de garantir la survie de la population dans son ensemble, il est nécessaire d'avoir des connaissances à la fois sur les mâles, comme c'est le cas dans cette étude, mais également sur les femelles, et les juvéniles. Une gestion de l'habitat en faveur des mâles adultes uniquement pourrait ne pas favoriser les femelles ou les juvéniles, si des différences intersexes ou inter-âge, aujourd'hui suspectées, venaient à être mises en évidence. Les rapaces juvéniles sont en effet connus pour leur phase de dispersion et d'erraticisme, après leur départ du nid, à la suite de laquelle ils établissent leur domaine (Limiñana *et al.*, 2011). La dispersion a un effet sur la survie des individus qui peut être différent suivant l'espèce considérée, mais son étude reste essentielle afin de prédire la capacité de l'espèce à coloniser de nouveaux territoires (Serrano, 2018). Les femelles chez *Circus maillardi* semblent plus sédentaires au moment de la nidification, et donc plus inféodées aux habitats de nidification, au contraire des mâles (Gonin, 2001, Valette, 2013).

L'utilisation d'un matériel de suivi par GPS moins coûteux, avec moins de fonctionnalités, mais en nombre plus important, pourrait permettre d'atteindre cet objectif par accroissement du nombre d'individus suivis, afin de recueillir des informations au sein de classes d'âge et de sexes plus équilibrés. La grande diversité des cultures incluses dans la catégorie « Agriculture diversifiée », permet également d'envisager dans des études ultérieures sur un plus grand nombre d'individus, l'étude spécifique des composantes de cette catégorie, en focalisant par exemple l'étude de la sélection de l'habitat du Papangue dans des zones où ces types de cultures sont les plus représentés, sur la commune de Saint Benoit par exemple, particulièrement entre la Rivière des Marsouins et la Ravine Sèche.

De même, l'observation des trajectoires n'a pas permis de déterminer le statut reproducteur des individus avec une précision suffisante, que ce soit sur la durée exacte de la nidification ou la localisation du nid potentiel. Du fait de l'étalement de l'activité reproductrice chez cette espèce au cours de l'année, ainsi que des variations plus faibles des paramètres environnementaux entre les deux saisons sous ces latitudes, un suivi de terrain des individus marqués aurait permis d'identifier avec précision leur statut, reproducteur ou non. Cela aurait permis d'éliminer les imprécisions inhérentes au découpage *a priori* des saisons, comme cela a été fait dans cette étude. La connaissance précise de ces sites de nidification, découlant du suivi de terrain, permettrait de différencier la sélection de l'habitat de nidification, de la sélection de l'habitat de chasse, ce que les données de cette étude n'ont pas permis de faire. Cette distinction, *via* la localisation des nids sur le terrain (Arroyo *et al.*, 2009, Real *et al.*,

2016), permet chez ces espèces de justifier la conservation d'habitats différents, essentiels à chaque étape de leur cycle de vie (Guixé & Arroyo, 2011). L'utilisation de la technologie GPS seule ne semble pas suffisante pour répondre à ces questions.

Les interactions avec les infrastructures électriques, et notamment le risque de collision qu'elles représentent, pourraient également être étudiées *via* une méthodologie adaptée de la littérature, en déterminant dès le départ la précision sur la mesure de la hauteur de vol, inexactes si les données ne sont pas calibrées, soit par des tests sur le terrain avec l'enregistrement de données à des altitudes connues (Thaxter *et al.* 2011), soit par une étude préliminaire des données à très hautes fréquence (1Hz) réputées plus précises (Corman & Garth, 2014).

Afin de connaître l'effet concret de l'habitat et des caractéristiques des domaines vitaux sur la dynamique de la population, ainsi que la survie des individus, la fécondité des couples doivent être reliées aux caractéristiques des domaines vitaux, que ce soit en termes de surface, de composition, ou de structuration des patches d'habitats autour du nid (distance entre le nid et les habitats de chasse par exemple) (Amar *et al.*, 2008, Crandall *et al.*, 2015). L'utilisation de ces connaissances dans la gestion des espaces naturels et agricoles, permettrait de favoriser concrètement l'augmentation de la population de cette espèce menacée.

Conclusion

Le Papangue (*Circus maillardi*) demeure, à l'échelle mondiale, l'espèce du genre *Circus* la plus menacée, ayant la répartition la plus restreinte. Longtemps restée peu étudiée, l'espèce fait depuis 2016 l'objet d'un programme FEDER, visant entre autres à acquérir des connaissances sur la biologie du Papangue, afin de pouvoir proposer des mesures de conservation appropriées.

La taille des domaines vitaux, calculé par saison, a pu être estimée autour de 4,5 km², et celle des domaines de cœur à 0,7 km², avec cependant une forte étendue des valeurs entre individus. Les cultures diversifiées ainsi que les zones d'élevage ont été identifiées comme particulièrement sélectionnées. Il a également été montré que la sélection de l'habitat par le Papangue peut varier en fonction de la saison. Ces premiers résultats montrent enfin que le Papangue a tendance à sélectionner les infrastructures anthropiques.

Cette première étude fine sur la sélection de l'habitat chez cette espèce menacée a donc permis de fournir de premiers résultats utiles pour la gestion, notamment par l'identification des habitats les plus favorables à l'espèce.

Néanmoins l'échantillon de la population utilisé dans cette étude, ne comportant que des mâles adultes, n'a pas permis d'étudier les variations de la taille des domaines vitaux et de la sélection de l'habitat en fonction des sexes et de l'âge des individus.

Des études ultérieures permettant d'identifier de potentielles différences intersexes et inter-âges, ainsi que le lien entre les paramètres démographiques et l'habitat du Papangue, permettraient de proposer des recommandations plus précises et plus pertinentes.

Bibliographie

Amar, A., Arroyo, B., Meek, E., Redpath, S., Riley, H., 2008. Influence of habitat on breeding performance of Hen Harriers *Circus cyaneus* in Orkney. *Ibis* 150: 400–404.

Arroyo, B., Amar, A., Leckie, F., Buchannan, G., Wilson, J. & Redpath, S., 2009. Hunting habitat selection by hen harriers on moorland: implications for conservation. *Biol. Conserv.* 142, 586–596.

Atuo, F.A., Roberts, K., Whitmore, S., Dotters, B.P., Raphael, M.G., Sawyer, S.C., Keane, J.J., Gutiérrez, R.J., Peery, M.Z., 2019. Resource selection by GPS-GSM-tagged California spotted owls in mixed-ownership forests. *Forest Ecology and Management* 433 : 295-304.

Bauder, J.M, Breininger, D.R, Bolt, M.R, Legare, M.L, Jenkins, C.L, Rothermel, B.B, *et al.*, 2018 Multi-level, multi-scale habitat selection by a wide-ranging, federally threatened snake. *Landsc Ecol.* Springer Hollande.

BirdLife International, 2016. *Circus maillardi*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T22728310A94979400.<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20163.RLTS.T22728310A94979400.en>. Téléchargé le 22 Août 2019.

Bolker, B., Skaug, H., Magnusson, A., Nielsen, A., 2012. Getting started with the glmmADMB package. Disponible sur: (<http://glmmadmb.r-forge.r-project.org/>), (Consulté le 27/08/2019).

Bretagnolle, V., Ghestemme, T., Thiollay J.M., Attié C., 2000. Distribution, population size and habitat use of the Reunion Marsh Harrier, *Circus m. maillardi*

Buckland, S., Cole, N.C., Godsall, B., Rodríguez-Pérez J., Gallagher L.E., Henshawb S.M., Harris S., 2014. Habitat selection of the Mauritian lowland forest day gecko at multiple spatial scales: A baseline for translocation

Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach, 2nd edn. Springer, Berlin.

Burt, W. H., 1943. Territoriality and home range concepts as applied to mammals. *J. Mammal.* 24, 346–352. (doi:10.2307/1374834)

Bosch, R., Real, J., Tintó, A., Zozaya, E., Land Castell, C., 2010. Home-ranges and patterns of spatial use in territorial Bonelli's Eagles *Aquila fasciata*. *Ibis* 152 : 105– 117.

Boyce, M.S., McDonald, L.L., 1999. Relating populations to habitats using resource selection functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(7), 268–272.

Calenge, C., 2006. The package adehabitat for the R software: a tool for the analysis of space and habitat use by animals. *Ecol. Model.* 197, 516–519.

Clouet M., 1978. Le Busard de Maillard (*Circus aeruginosus maillard*) de l'île de la Réunion

Cœurdaissier, M., Villers, A., Augiron, S., Sage, M., Couzi, F.X., Lattard, V., Fourel, I., 2019. Pesticides threaten an endemic raptor in an overseas French territory. *Biological Conservation* 234 : 37-44.

Cohen, B. S., Prebyl, T. J., Collier, B. A., and Chamberlain, M. J., 2018. Home range estimator method and GPS-GSM fix schedule affect selection inferences for wild turkeys. *Wildlife Society Bulletin* 42: 150– 159.

Contributeur à Wikipédia, Estimation par noyau [s.d.]. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Estimation_par_noyau (Consulté le 01/08/2019)

Corman, A.-M., Garthe, S., 2014. What flight heights tell us about foraging and potential conflicts with wind farms: a case study in Lesser Black-backed Gulls (*Larus fuscus*). *Journal of Ornithology*, 155, 1037–1043.

Courmont, L., De Sousa L., 2011. Plan national d'actions en faveur de l'Émyde lépreuse *Mauremys leprosa* 2012-2016. Groupe Ornithologique du Roussillon – Ministère de Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. 108 pp.

Crandall, R.H., B., Bedrosian and Craighead, D., 2015. Habitat selection and factors influencing nest survival of Golden Eagles in south-central Montana. *Journal of Raptor Research* 49: 413–428

DAAF, 2012. Base de l'Occupation du Sol. Ile de La Réunion, 2012.

Domenech R., Bedrosian B.E., Crandall R.H., Slabe V.A., 2015. Space Use and Habitat Selection by Adult Migrant Golden Eagles Wintering in the Western United States. *J Raptor Res.* 2015;49: 429–440.

Dupont, P., 2010. Plan national d'actions en faveur des Maculinea. Office pour les insectes et leur environnement-Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 138 pp.

Eccleston, D.T., Harness, R.E., Raptor Electrocutions and Power Line Collisions. In : Sarasola, J.H., Grande, J.M., Negro, J.J. *Birds of prey: biology and conservation in the XXI century*. Springer, pp.273-307.

Foerster, C.R., Vaughan, C., 2002. Home range, habitat use, and activity of Baird's tapir in Costa Rica. *Biotropica* 34: 423– 437.

Fieberg J., 2007. Kernel density estimators of home range: smoothing and the autocorrelation red herring. *Ecology* 88, 1059–1066. [doi:10.1890/06-0930](https://doi.org/10.1890/06-0930)

Ghestemme, T., Portier, E., Le Corre, M., 1998. Recensement de la population de Papanges de la Réunion, *Circus maillardi maillardi*, densité et distribution des couples reproducteurs. SEOR. 14 p et Annexes 10 p.

Gonin, J. 2001, Le « Papangue », un endémique rare et méconnu, Rapport de BTS Gestion et Protection de la Nature, Programme de recherches des Oiseaux terrestres de La Réunion SEOR. 38 p.

Grondin V., Philippe J.S., 2011. Plan de conservation du Busard de Maillard, *Circus maillardi*.

Guil, F., Fernández-Olalla, M., Moreno-Opo, R., Mosqueda, I., Gómez, M.E., *et al.*, 2011. Minimising Mortality in Endangered Raptors Due to Power Lines: The Importance of Spatial Aggregation to Optimize the Application of Mitigation Measures. *PLoS ONE* 6(11): e28212. doi:10.1371/journal.pone.0028212

Guixé, D., Arroyo, B., 2011. Appropriateness of Special Protection areas for wide ranging species: the importance of scale and protecting foraging, not just nesting habitats. *Animal Cons.* 14, 391–399.

Hemson, G., Johnson, P., South, A., Kenward, R., Ripley, R., Macdonald, D., 2005. Are kernels the mustard? Data from global positioning system (GPS) collars suggests problems for kernel home-range analyses with least-squares cross-validation. *Journal of Animal Ecology*, 74, 455–463.

Hennique, S., Mourgaud, G., Deceuninck, B., Chanson, C., 2013. Deuxième plan national d'actions en faveur du Rôle des genêts (*Crex crex*) 2013-2018. LPO, LPO Anjou, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, DREAL des Pays de la Loire 140 pp.

Hunter, M., Gibbs, J.P., 2007. *Fundamentals of Conservation Biology*. Third Edition, Blackwell Science, Cambridge, Massachusetts.

Institut national de la statistique et des sciences économiques. 2019. Comparateur de territoire, département de La Réunion (974) [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=DEP-974+FRANCE-1+COM33192+COM-33251> .Consulté le 22/08/2019.

Johnson, D. H. 1980. The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference. *Ecology* 61: 65– 71.

Kahle, D., Wickha, H., 2013. ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. *The R Journal* 5, 144–61.

Kenward, R.E., 2001, *A manual for wildlife radiotracking*, Academic Press, London.

Knapp, C.R., Owens, A.K., 2005. Home range and habitat associations of a Bahamian iguana: implications for conservation. *Animal Conservation* 8:269–278.

Kuhn R., Simonnet F., Arthur C. & Barthélemy V., 2019. Plan national d'actions en faveur de la Loutre d'Europe (*Lutra lutra*) 2019-2028. SFEPM & DREAL Nouvelle-Aquitaine, Poitiers, 89 pp.

Lagabrielle, E., Rouget, M., Payet, K., Wistebaar, N., Durieux, L., Baret, S., Lombard, A., Strasberg, D., 2009. Identifying and mapping biodiversity processes for conservation planning in islands: A case study in Réunion Island (Western Indian Ocean). *Biological Conservation* 142: 1523–1535.

Laver, P.N., Kelly, M.J., 2008. A critical review of home range studies. *J. Wildl. Manage.*, 72, 290–298.

- Lewin-Koh, N.J., Bivand, R., 2012. Package mapproj. <http://cran.r-project.org/>
- Liminaña, R., García, J.T., Guerrero, A., González, J.M., Lavedán, J., Moreno, J.D., *et al.*, 2012. Phylopatry and natal dispersal of Montagu's harriers *Circus pygargus* breeding in Spain: a review of existing data. *Eur. J. Wildlife Res.*, 58, 549–555.
- Makowski, C., Seminoff, J.A. & Salmon, M., 2006. Home range and habitat use of juvenile Atlantic green turtles (*Chelonia mydas* L.) on shallow reef habitats in Palm Beach, Florida, USA. *Marine Biology*, 148, 1167– 1179.
- Manly, B., McDonald, L., Thomas, D., McDonald, T., and Erickson, W., 2002. Resource selection by animals: statistical design and analysis for field studies. Second edition. Kluwer Press. New York, New York, USA.
- Massaro M., Chick, A., Kennedy E.S., Whitsed, R., 2018. Post-reintroduction distribution and habitat preferences of a spatially limited island bird species. *Animal Conservation*, 21, 54–64.
- Mayor S. J., Schneider D. C., Schaefer J. A. & Mahoney S. P. 2009. Habitat selection at multiple scales. *Ecoscience* 16, 238–247.
- Mittermeier, R.A., Turner, W.R., Larsen, F.W., Brooks, T.M., Gascon, C., 2011. Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. In : Zachos, F.E., Habel, J.C., *Biodiversity hotspots: distribution and protection of conservation priority areas*, Springer, Heidelberg, pp. 3–22.
- Mourer-Chauviré, C., Bour, R., Ribes, S., Moutou, F., 1999. The avifauna of Réunion Island (Mascarene Islands) at the time of the arrival of the first Europeans. *Smithson. Contrib. Paleobiol* 89:1–38.
- Mourer-Chauviré C., Bour R., Ribes S., 2004. The taxonomic identity of *Circus alphonssi* (Newton & Gadow 1893), the extinct harrier from Mauritius
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Notter, J.C., Baret, S., Lequette, B., Lagabrielle, E., Dupont, J., Strasberg, D., 2010. Cartographie des milieux naturels de l'île de La Réunion : éléments pour établir une méthodologie de mise à jour régulière. Les enjeux de conservation de la flore menacée des collectivités françaises d'Outre-Mer, Conservatoire Botanique National de Mascarin, Saint-Leu, réunion, 13-17 décembre 2010.
- Poessel S.A., Bragin E.A., Sharpe P.B., Garcelon D.K., Bartoszek K.,
- Oatley, G., Simmons, R.E., Fuchs, J., 2015. A molecular phylogeny of the harriers (*Circus*, *Accipitridae*) indicate [sic] the role of long distance dispersal and migration in diversification. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 85:150–160.
- Poessel S.A., Bragin E.A., Sharpe P.B., Garcelon D.K., Bartoszek K., Katzner T.E., 2018. Movements and landscape use of Eastern Imperial Eagles *Aquila heliaca* in Central Asia
- Real, J., Bosch, R., Tintó, A., Hernández-Matías, A., 2016. Identifying key habitats for the conservation of Bonelli's Eagle *Aquila fasciata* using radiotracking. *Ibis*, 158(3), 556– 568.

René de Roland, L.A., Rabearivony, J., Randriamanga, I., 2004. Nesting biology and diet of the Madagascar harrier (*Circus macroscelus*) in Ambohitantely special reserve, Madagascar. *J. Raptor Res.* 38(3) : 256-262

René de Roland, L.A., Thorstrom, R., Razafimanjato, G., Rakotondratsima, M.P.H., Andriamalala, T.R.A., Sam, T.S., 2009. Surveys, distribution and current status of the Madagascar Harrier *Circus macroscelus* in Madagascar. *Bird Conser. Int.* 19, 309–322.

Rey, F., 2019. Étude de la biologie de reproduction d'une espèce endémique en danger d'extinction, le Busard de Maillard *Circus maillardi*, et implications pour sa conservation., Rapport de stage Master 1 IEGB.

Rollan, Á., Real, J., Bosch, R., Tintó, A., Hernández-Matías, A., 2010. Modelling the risk of collision with power lines in Bonelli's Eagle *Hieraetus fasciatus* and its conservation implications. *Bird Conserv Int* 20: 279–294.

Seaman, D. E., Millspaugh, J.J., Kernohan, B.J., Brundige, G.C., Raedeke, K.J., Gitzen, R.A., 1999. Effects of sample size on kernel homerange estimates. *Journal of Wildlife Management* 63:739–747.

Serrano, D., Dispersal in Raptors. In : Sarasola, J.H., Grande, J.M., Negro, J.J. *Birds of prey: biology and conservation in the XXI century.* Springer, pp.95-121.

Sievert, C., Parmer, C., Hocking, T., Chamberlain, S., Ram, K., Corvellec, M., & Despouy, P., 2016. plotly: Create interactive web graphics via 'plotly.js'. R package version 4.9.0. <https://CRAN.R-project.org/package=plotly>

Silva, I., Crane, M., Suwanwaree, P., Strine, C., Goode, M., 2018. Using dynamic Brownian Bridge Movement Models to identify home range size and movement patterns in king cobras. *PLoS ONE* 13 (9): e0203449. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203449>

Simmons, R.E., Legra, L.A.T., 2009. Is the Papuan Harrier globally threatened species? Ecology, climate change threats and first population estimates from Papua New Guinea. *Bird Conserv. Int.* 19:1–13.

Soulé, M.E., 1985. What is conservation biology? *BioScience* 35, 727 -734.

Temeles, E. J., 1987. The relative importance of prey availability and intruder pressure in feeding territory size regulation by harriers, *Circus cyaneus*. *Oecologia* 74:286–297.

Trierweiler, C., Drent, R.H., Komdeur, J., Koks, B.J., 2010. Home range size and habitat selection of the endangered Montagu's harrier *Circus pygargus* in NW-Europe: implications for conservation. In Trierweiler C. (2010) *Travels to feed and food to breed.* PhD Thesis, Rijksuniversiteit Groningen.

Thaxter, C.B., Ross-Smith, V.H., Clark, N.A., Conway, G.J., Rehfish, M.M., Bouten, W., Burton, N.H.K., 2012. Measuring the interaction between marine features of Special Protection Areas with offshore wind farm development zones through telemetry: first breeding season report. BTO Research Report No. 590, BTO, Thetford.

UICN,. A propos [en ligne]. 2019. Disponible sur : <https://www.iucn.org/fr/a-propos> (Consulté le 30/08/2019)

Vallette C., 2013. Écologie du Busard de Maillard- sur les Hauts de la ville de Bras-Panon, Rapport de stage Master 2 BEST

Worton, B.J., 1989. Kernel methods for estimating the utilization distribution in home-range studies. *Ecology*, 70, 164–168.

Zeale, M.R.K., Davidson-Watts, I., Jones, G., 2012. Home range use and habitat selection by barbastelle bats (*Barbastella barbastellus*): implications for conservation. *J Mammal* 93:1110–1118

Zeller, K.A., Vickers, T.W., Ernest, H.B., Boyce, W.M., 2017. Multi-level, multi-scale resource selection functions and resistance surfaces for conservation planning: Pumas as a case study. *PLoS ONE* 12(6): e0179570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179570>

LECLERC Kalyan

Étude préliminaire des domaines vitaux et de la sélection de l'habitat par le Busard de Maillard (*Circus maillardi*) à l'île de La Réunion.

Résumé. — Le Busard de Maillard (*Circus maillardi*), appelé Papangue à l'île de La Réunion d'où il est endémique, est l'espèce du genre *Circus* la plus menacée, avec la répartition la plus restreinte au monde. Peu étudiée jusqu'à présent, l'espèce a fait l'objet d'un programme de conservation depuis 2017, visant à mieux connaître l'espèce afin de mieux la protéger. L'étude présentée ici se base sur le suivi de six mâles adultes, entre 2017 et 2019, par GPS-GSM. Les données recueillies ont permis de déterminer, la taille des domaines vitaux des individus ainsi que la sélection des habitats, pour chaque saison (en reproduction, entre janvier et août, et hors reproduction), type de disponibilité de la ressource (disponibilité homogène ou contrainte par un centre d'activité) et niveau d'étude (domaine vital, paysage), *via* une fonction de sélection de la ressource. Ces premiers résultats montrent une surface des domaines vitaux qui varie entre 2,3 et 55,5 km². Suivant le niveau d'étude et la saison, la catégorie « Agriculture diversifiée » peut être quatre fois plus sélectionnée que les végétations indigènes. Les zones liées à l'élevage ainsi que les « Formations secondaires hautes » sont également sélectionnées, au contraire des zones urbaines et périurbaines, qui sont fortement évitées. Le facteur pente fait lui l'objet d'une sélection faible mais sensible, tout comme les infrastructures électriques, et routières en particulier. Les habitats sélectionnés par l'espèce devraient être préservés en priorité de l'urbanisation dans les documents d'aménagement du territoire, et priorités pour l'application des bonnes pratiques de lutte contre les rongeurs.

Mots clés : *Circus maillardi*, domaine vital, sélection de l'habitat, île de La Réunion

Preliminary study of the home range and habitat selection of the Reunion Harrier (*Circus maillardi*) on Reunion Island.

Abstract. — The Reunion Harrier (*Circus maillardi*), called Papangue in Reunion Island where it is endemic, is the most threatened species of the *Circus* genera, with the most limited range. Understudied until now, this species is concerned by a conservation programme since 2017, to improve knowledges and so the protection of this species. The study presented here is based on the tracking of six adult males, between 2017 and 2019, using GPS-GSM technology. The data collected was used to determine the home range of each individual, and the habitat selection, for each season (breeding ,between January and August, and non-breeding), availability of the resource (homogenous availability or constrained by a center of activity), and level of study (home range, landscape), *via* resource selection functions. First results show that the home ranges size for this species vary between 2,3 and 55,5 km². Depending on the level, the category “Diversified agriculture” can be four time more likely to be selected than indigenous vegetation. Farming areas and “High secondary formations” are also selected, unlike urban and suburban areas, which are strongly avoided. The slope of the terrain is weakly but clearly selected, so are the electrical infrastructures, and road infrastructure particularly. Habitats selected by this species should be preserved from urbanization in town planning documents and prioritized for the application of good practices for rodents control.

Keywords: *Circus maillardi*, home range, habitat selection, Reunion Island