



Master 1 Biodiversité Ecologie Evolution
parcours Ingénierie en Ecologie et Gestion de la Biodiversité

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.



Par Fanny REY

Du 01/04/2019 au 23/08/2019

À la Société d'Études Ornithologiques de La Réunion (SEOR)

Encadré par

Alexandre Villers - Ingénieur spécialiste Unité Avifaune migratrice, ONCFS
Station de Chizé

Damien Chiron - Coordinateur du programme FEDER ECoPap, SEOR

Steve Augiron - Responsable scientifique du programme FEDER ECoPap, SEOR

Tuteur de stage

Olivier Duriez - Maître de Conférences, Université de Montpellier

REMERCIEMENTS

Je remercie chaleureusement les trois encadrants de ce stage qui m'ont permis de vivre cette belle et riche expérience.

Je remercie Dr. Alexandre Villers, pour son soutien scientifique et son aide précieuse dans le choix des analyses statistiques. Merci de m'avoir apporté cette réflexion scientifique et permis d'acquérir de nouvelles compétences sur R.

Un grand merci à la super équipe « Papangue », merci pour cette ambiance de travail dans une bonne humeur perpétuelle, merci pour la transmission de vos connaissances et pour m'avoir permis de faire mes premiers pas en baguage lors de ce stage.

Merci à Dr. Steve Augiron pour son dynamisme, son ambition et son aide pour la rédaction du rapport. Merci également pour les opportunités de terrain.

Un grand merci à Damien Chiron pour toute son aide et son investissement dans la réalisation de ce stage, sa bonne humeur, pour les bons conseils en tout genre et sa disponibilité durant tout le stage.

Merci à Pierrick Ferret pour m'avoir emmené sur le terrain et accompagné lors de mon premier baguage. Merci aussi pour tes conseils avisés tout au long de cette étude.

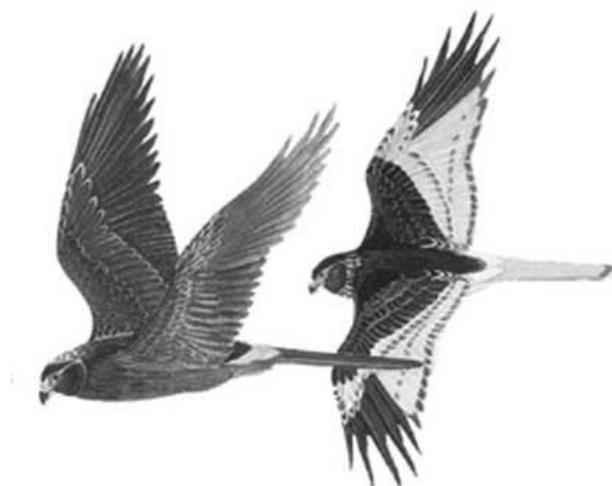
Merci à Christel Yeung Shi Chung ma collègue et voisine de bureau pour sa bonne humeur et son soutien moral apporté lors des moments compliqués sur R.

Enfin je remercie toute l'équipe de la Société d'Etudes Ornithologique de La Réunion pour leur accueil et l'ambiance chaleureuse que l'on ressent dans les locaux.

J'adresse mes sincères remerciements à Jean-François Blanc pour le partage des données sur le suivi des nids du Busard des Roseaux qui m'a aidé pour la réalisation de cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

PREAMBULE	1
I. INTRODUCTION	2
II. MATÉRIELS & MÉTHODES	7
1. Espèce étudiée : Le Busard de Maillard	7
2. Site d'étude	8
3. Acquisitions et descriptions des données	9
4. Analyses statistiques	10
III. RESULTATS	13
1. Paramètre reproducteur	13
2. Phénologie de reproduction	15
3. Évaluation des types de comportements observés selon le stade de nidification	15
IV. DISCUSSION et PERSPECTIVES	17
BIBLIOGRAPHIE	21
ANNEXES	25



Barré 1982

PREAMBULE

La Société d'Études Ornithologiques de La Réunion (SEOR), créée en 1997, est une association (Loi 1901) de protection de l'environnement spécialisée dans la conservation des oiseaux de La Réunion. Pionnière dans la conservation de l'avifaune de l'île, elle a été créée par des naturalistes passionnés par l'ornithologie afin de protéger le Pétrel de Barau (*Pterodroma barau*), espèce en danger, endémique de La Réunion. Elle a depuis sa création élargi ses compétences et domaines d'activités. Constituée de trois salariés en 1999, elle en compte aujourd'hui, 20 ans plus tard, dix-huit et regroupe quatre cent sept adhérents en 2018. L'association est située au nord-est de l'île sur la commune de Saint-André et possède également une antenne au sud de l'île, à Saint-Pierre. Son budget annuel de 1 059 277€ en 2018 est constitué de diverses contributions financières (cotisations, subventions, participation au financement d'un projet, mécénats) ou de dons en nature (bien mobilier ou immobilier, marchandise, prestation de services, mise à disposition de moyens humains, matériels ou techniques). La SEOR a pour but de favoriser la conservation de l'avifaune de La Réunion et de ses milieux. Elle s'articule autour de cinq pôles d'activités, le sauvetage des oiseaux en détresse grâce à un centre soin, l'éducation à l'environnement, les études pour la conservation des oiseaux, la gestion d'espaces naturels, la vie associative via l'animation du réseau de bénévoles.

Le stage que j'effectue s'inscrit dans le pôle étude et conservation, axé sur l'étude du Busard de Maillard *Circus maillardi* au sein de l'équipe « Papangue » (nom créole du Busard de Maillard). Les missions du stage s'intègrent dans un programme FEDER dénommé « Écologie et Conservation du Papangue » (ECoPap) et s'inscrit dans le premier volet de ce programme (qui en compte quatre, *annexe 1*) « amélioration des connaissances fondamentales sur l'écologie de l'espèce » sur la sous-action : « suivi de la reproduction ». Elle a pour objectif d'améliorer les connaissances sur les éléments de la biologie de reproduction du Busard de Maillard et d'en élaborer des perspectives de conservation adaptées. L'équipe « Papangue » est pour sa part composée de quatre salariés, deux agents de terrain, un coordinateur à temps plein et un responsable scientifique à temps partiel. L'acquisition des données a été réalisée par les différents agents de la SEOR ayant pris part à la conservation de l'espèce : Colombe Valette (2013-2015), Pierrick Ferret (2015-2019), Thibaut Couturier (2016-2017), Damien Chiron (2018-2019) et Christel Yeung Shi Chung (2018-2019).

I. INTRODUCTION

L'érosion de la biodiversité est aujourd'hui l'un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle. Les extinctions dans certains groupes d'organismes révèlent des taux, 100 à 1000 fois plus élevés que les taux attendus sur la base de données géologiques (Dirzo & Raven 2003). Le rapport d'évaluation mondiale de l'IPBES sur la biodiversité et les services écosystémiques rédigé en 2019 (IPBES 2019) réaffirme que les changements observés à l'échelle planétaire sont aujourd'hui indiscutables, et appelle à un sursaut pour la survie de l'humanité. Les experts mondiaux relèvent que jusqu'à un million d'espèces sont menacées d'extinction, dont de nombreuses au cours des prochaines décennies, et cette tendance, s'accélère. En 1984, Diamond présentait les quatre mécanismes clés susceptibles d'entraîner des extinctions : la surexploitation, la destruction de l'habitat, les espèces exotiques envahissantes et les co-extinctions (Diamonds 1984). Aujourd'hui le changement climatique et la pollution sont également considérés comme des facteurs directs de changement qui affectent négativement les milieux naturels, augmentant le risque d'extinctions (IPBES 2019).

A l'échelle mondiale, la biodiversité n'est pas distribuée uniformément, certaines zones présentant une concentration exceptionnelle d'espèces endémiques. Les zones insulaires, notamment, ont un très fort taux d'endémisme et contribuent fortement à la biodiversité mondiale (Stattersfield & Capper 2000, Brooks et al. 2006, Mittermeier et al. 2011). Ces « hotspots » de biodiversité ont été identifiés sur l'ensemble du globe et constituent un des outils mis en place et très utilisés dans le domaine de la biologie de la conservation (Myers et al. 2000). Trente-cinq régions du monde sont classées en « hotspot » (figure 1), ces espaces sensibles et fortement menacés, contiennent au moins 1500 espèces de plantes endémiques connues et ont perdu au moins 70% de leur habitat original (Myers et al. 2000, Conservation International 2004). Ces zones représentaient auparavant 15.9 % de la surface de la terre, soit 23.7 millions de km². Depuis le siècle dernier, avec la destruction des habitats et le développement exponentiel de la population mondiale, ces territoires ont vu une diminution de 85 % de leur surface, ils n'occupent, à présent, plus que 2.3% de la surface du globe, soit 3.4 millions de km² (Russell A. et al. 2011). Au sein de ces hotspots, les habitats les plus représentés sont les forêts tropicales et les systèmes insulaires totalisant 70% des cas. Ce sont d'ailleurs ces mêmes forêts tropicales qui subissent le plus d'extinction notamment en milieu insulaire (Dirzo & Raven 2003, Mittermeier et al. 2005).

En effet, les îles sont marquées par un syndrome d'insularité impliquant des mécanismes évolutifs différents de ceux des écosystèmes continentaux, en renfermant généralement, une diversité spécifique plus faible, un taux d'endémisme plus élevé, un élargissement des niches écologiques, ainsi qu'une pression de prédation amoindrie (Mac Arthur & Wilson 1967). En conséquence, les espèces insulaires ont développé des adaptations spécifiques à leur environnement, telle qu'une diminution ou une perte des capacités de dispersion et des comportements de défense, en étant souvent, plus vulnérables aux changements de leur habitat ainsi qu'à l'introduction d'espèces plus compétitives (Vilà *et al.* 2011).

L'île de La Réunion constitue un très bon exemple d'espace insulaire fortement impacté par l'arrivée de l'homme. Cette île fait partie intégrante du « hotspots » de biodiversité mondiale intitulé : « Madagascar et les îles de l'Océan Indien » (Myers *et al.* 2000, Mittermeier *et al.* 2004a). La Réunion est une terre jeune, apparue il y a 2 à 3 millions d'années (Mac Arthur & Wilson 1967), où l'Homme est arrivé il y a seulement 350 ans (Maillard 1863). Son arrivée a été la cause d'une importante perte de biodiversité en partie due à l'importation d'espèces exogènes et envahissantes ayant engendré l'extinction des espèces endémiques et l'expansion d'espèces exotiques envahissantes. Depuis l'occupation européenne de l'île en 1665 (Maillard 1863), 73 % de la végétation indigène a été convertie en terres agricoles (36 %), en zones urbanisées (12 %) et colonisée par les espèces envahissantes (25 %) (Lagabrielle 2007) (figure 2). Ainsi, 592 espèces de plantes, 20 espèces oiseaux, 8 espèces de mammifères, 12 espèces de reptiles et 2 espèces d'amphibiens exotiques se sont naturalisées sur l'île. A contrario, la moitié de la faune vertébrée indigène a disparu dont 55 % des espèces d'oiseaux (i.e. 22 espèces). Par ailleurs, 18 % de la flore indigène et 35 % des vertébrés toujours présents ont à l'heure actuelle un statut « en danger » ou « quasi- menacés » (Lagabrielle 2009, Le Corre & Safford 2001, UICN 2010). En effet, on remarque que les îles océaniques comme La Réunion connaissent une forte proportion d'espèces endémiques en dangers d'extinction mais ne sont pas très riches en nombre d'espèces et notamment d'oiseaux (Le Corre & Safford 2001, UICN 2010).

Aujourd'hui, le constat est alarmant, parmi les sept espèces d'oiseaux endémiques restantes sur cette île, quatre sont menacées d'extinction, comprenant entre autres le Busard de Maillard (Le Corre & Safford 2001). Cette espèce de rapace diurne, décrite par Verreaux en 1862 (Maillard 1963) fait partie de la famille des *Accipitridae* (ordre des Accipitiformes) et du genre *Circus* qui compte 16 espèces de Busard dans le monde (Simmons 2000).

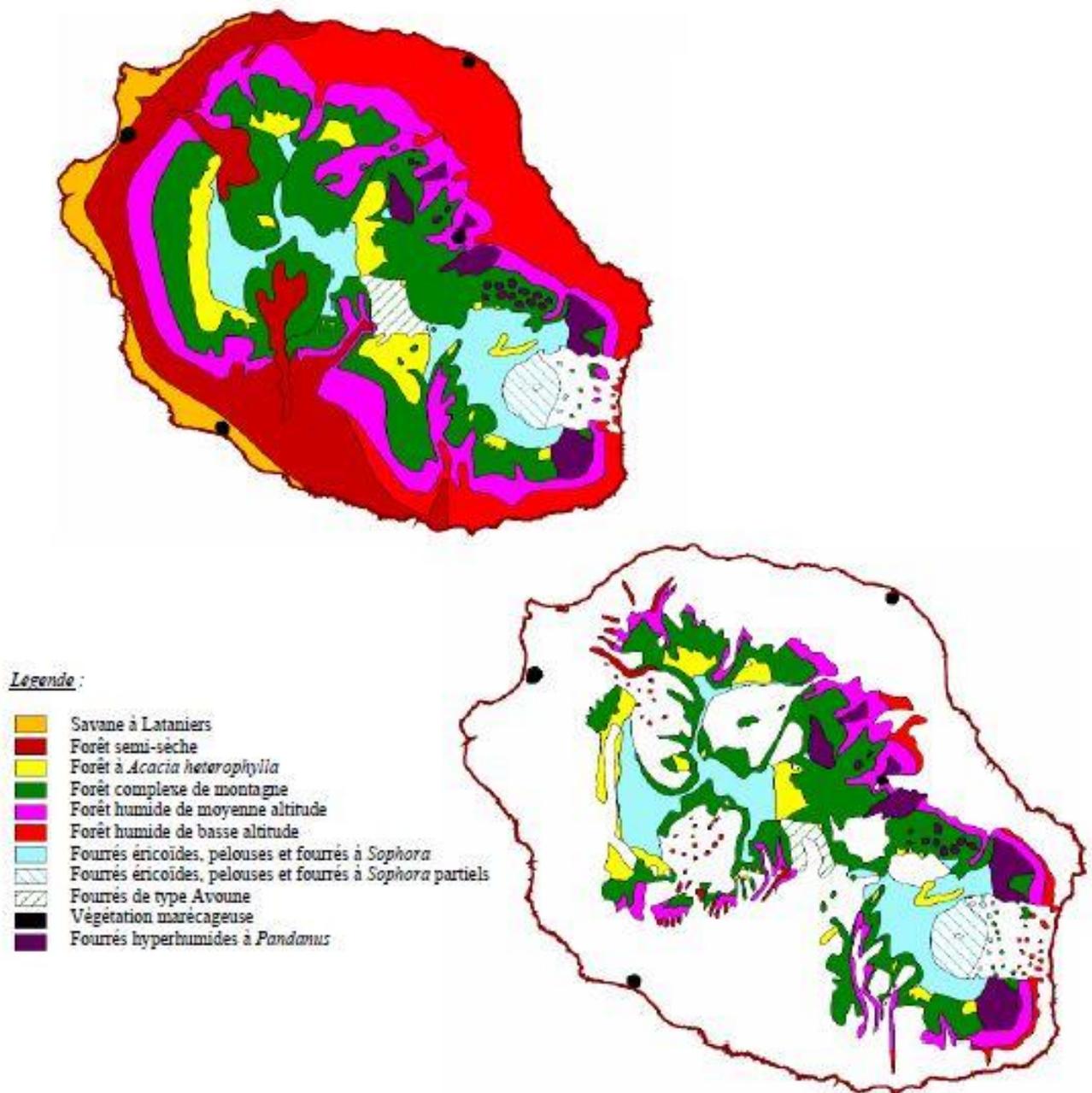


Figure 2 : végétation indigène de La Réunion avant et après colonisation humaine (Cadet, 1980)

Si l'espèce a longtemps été considérée comme une sous-espèce du Busard de Madagascar (*Circus macroscelus*) l'étude génétique de Simmons en 2000 a permis de montrer que l'espèce était distincte de celle de Madagascar depuis environ 760 000 ans, faisant du Busard de Maillard une espèce à part entière (*figure 3*). Présent précédemment à l'île Maurice ([Mourer-Chauviré et al. 2004](#)), il a aujourd'hui disparu et de ce fait n'est observable qu'à La Réunion. A l'heure actuelle, le Busard de Maillard est le dernier rapace endémique de l'île. En effet, la famille des rapaces diurnes comprenait auparavant trois espèces sédentaires ([Dubois 1674](#)), dont une n'ayant pas pu être déterminée ([Probst, 1990](#)). Le Busard de Maillard a su réaliser une incroyable adaptation à son milieu particulier sur l'île. Auparavant, à Madagascar, son ancêtre fréquentait plutôt des milieux ouverts de plaines et des marais situés la plupart du temps en basse altitude tout comme les espèces de busard les plus apparentées ([René de Roland et al. 2004](#), [Guillot 1984](#)). Sur l'île de La Réunion, il s'est adapté au milieu à végétation plus dense, alliant forêt tropicale et végétation éparse. L'évolution de l'espèce dans ce milieu particulier de l'île a induit des adaptations morphologiques avec l'apparition d'attributs particuliers favorisant la chasse en milieu forestier : ailes plus courtes et corps plus trapu ([Clouet, 1978](#)).

Depuis la colonisation de l'île par l'Homme, le Busard de Maillard, comme beaucoup d'autres oiseaux indigènes, fait l'objet d'une forte pression de destruction ([Grondin & Philippe 2011](#)). L'espèce n'a été retirée de la catégorie « vermine » dans laquelle elle était classée depuis la colonisation, qu'en 1966, soit plus de 300 ans après l'arrivée des hommes. Sa population à cette période sur l'île de La Réunion est décrite comme « abondante » ([Dubois, 1672](#)). Il faudra attendre 1974 pour que sa chasse et sa capture soient officiellement interdites ([Grondin & Philippe, 2011](#)). Avant 2010, l'espèce n'avait pas été soumise aux Listes Rouges¹ mais elle bénéficiait du statut d'espèce protégée depuis l'arrêté ministériel du 17 février 1989, fixant les mesures de protection des espèces animales dans le département de La Réunion. Depuis, l'espèce est classée « en danger » selon les critères de l'IUCN : « population extrêmement petite sur une zone réduite, où son habitat est en constante baisse et dégradation » ([BirdLife International 2016](#)). Au niveau européen, l'espèce est également prise en considération dans plusieurs conventions (Annexe II convention de Berne, Annexe II et B du Règlement Communautaire CITES). Le Busard de Maillard est l'une des trois espèces les plus menacées de son genre selon le classement de l'IUCN 2016 au même titre que le Busard de Madagascar et le Busard Maure (*Circus maurus*).

1 La liste Rouge de l'IUCN, constitue l'inventaire mondial le plus complet et global sur les espèces végétales et animales.

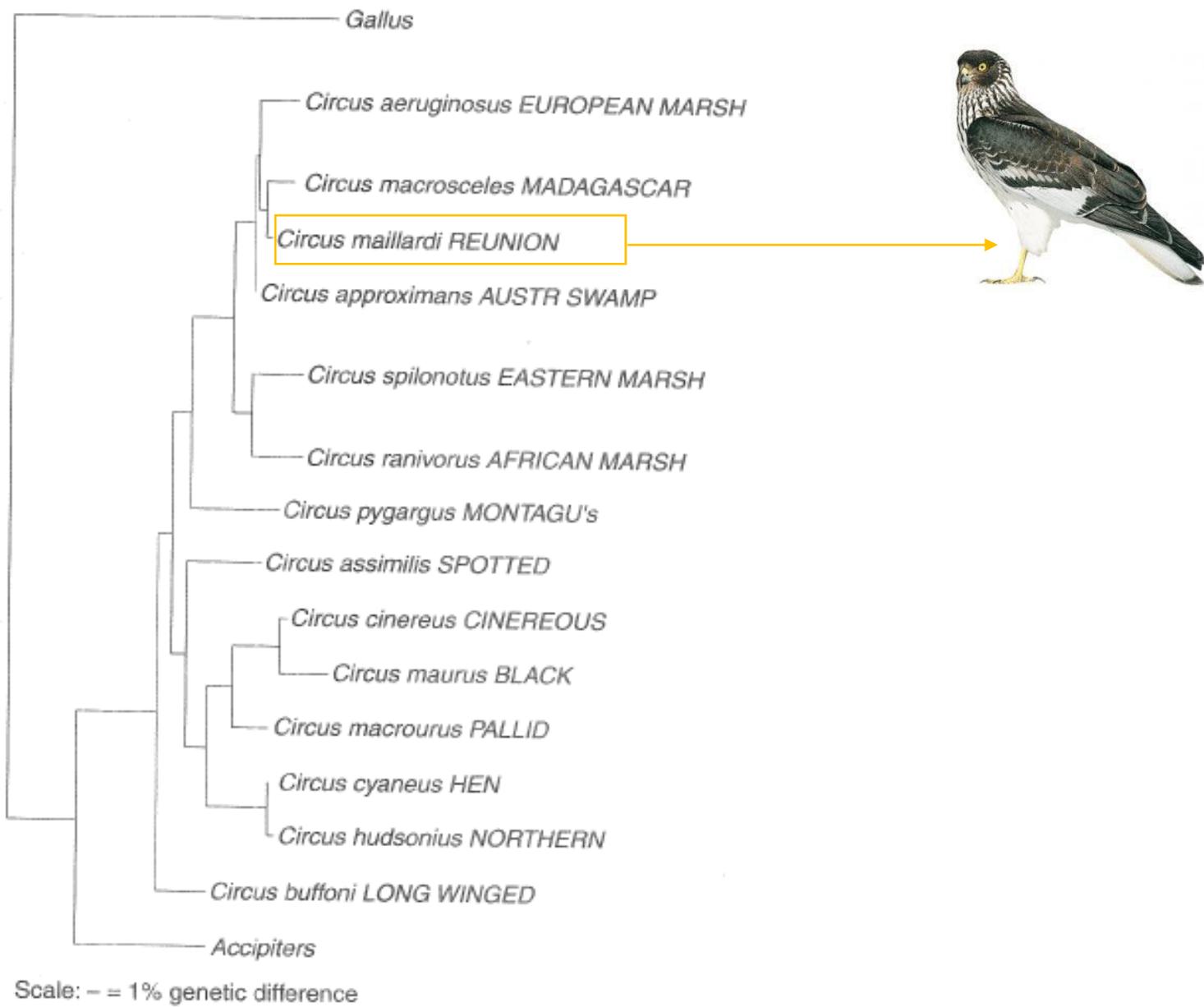


Figure 3 : arbre phylogénétique des espèces du genre *Circus* d'après Simons (2000).

Malgré les très forts enjeux de conservation qui pèsent sur l'espèce, les connaissances sur son écologie sont relativement lacunaires. Trois menaces principales ont été identifiées pour l'espèce : le braconnage, les collisions et l'empoisonnement secondaire par les rodenticides² (Coeurdassier *et al.* 2019, Grondin & Philippe 2011). Les milieux les plus utilisés par l'espèce pour la chasse sont les interfaces entre milieu naturel et milieu anthropisé notamment les champs cultivés pour la canne à sucre (Bretagnolle *et al.* 2000). Ces types d'habitats sont susceptibles d'accueillir de fortes densités de rongeurs et d'être traités de manière, préventive, intensive et permanente. De ce fait, le Busard de Maillard, s'alimentant prioritairement au sein de ces habitats, est plus fortement exposés aux menaces d'empoisonnement. Ces zones d'alimentation pourraient ainsi constituer de véritables pièges écologiques pour l'espèce (Coeurdassier *et al.* 2019). Au vu des enjeux de conservation et de l'impact potentiel des rodenticides sur la viabilité des populations, il devient donc primordial de mettre l'accent sur une amélioration des connaissances de l'écologie de l'espèce afin de proposer des mesures de conservation efficaces, adaptées à l'espèce et à ses menaces.

Parmi ces éléments, l'étude et l'évaluation de certains facteurs sont primordiaux dans la dynamique des populations de l'espèce. Ceci est, notamment le cas des paramètres reproducteurs et de la phénologie de l'activité de reproduction. Les différents paramètres de reproduction (date et taille de ponte, volume des œufs, succès à l'éclosion, succès de la reproduction, nombre de jeunes à l'envol) chez les oiseaux, permettent de renseigner à la fois sur l'investissement des individus, leur qualité mais également sur la qualité de l'habitat et des ressources alimentaires disponibles (Cam *et al.* 2003). Ces relations habitats-individus vont donc jouer un rôle important pour la survie des individus, et plus largement sur la dynamique de la population. La connaissance des paramètres de reproduction comme le succès reproducteur, la survie des jeunes, sont utilisés par la suite dans les études de dynamique des populations à travers des analyses de viabilité des populations (Beissinger & Westphal 1998). De telles études sont essentielles pour identifier des mesures de conservation efficaces pour les espèces menacées et estimer des tendances sur les années à venir notamment dans un contexte d'extinction rapide des espèces (Steenhof & Newton 2007).

² Un produit rodenticide ou raticide est une substance active ou une préparation ayant la propriété de tuer des rongeurs.

L'étude de la phénologie de reproduction permet d'adapter au mieux les méthodes de suivi des populations. En effet, certains recensements démographiques peuvent être appliqués en fonction de la fréquence des comportements reproducteurs des individus (par exemple, pour maximiser la probabilité de détecter un comportement indiquant la présence d'un couple reproducteur) et ce afin d'estimer un nombre de couples reproducteurs dans la population (Fond International pour les rapaces 1982). C'est l'objectif de l'Action A1 du programme FEDER en question : « Démographie et Sciences participatives », qui consiste à estimer la taille de la population et la répartition du Busard à l'échelle de l'île de La Réunion.

Ces deux aspects d'études étroitement liés permettront d'adapter la gestion de site en décrivant précisément des périodes de dérangement minimal. Ces périodes pourront être utilisées lors de travaux et d'aménagements du territoire, et permettront aussi de proposer la réalisation de calendriers ajustés à la reproduction lors des campagnes de dératisation pour limiter l'empoisonnement secondaire par rodenticides. L'étude de ces paramètres permet alors d'obtenir un aperçu de l'état de la population et de présenter les facteurs qui peuvent l'influencer. Additionnellement, cela permet d'adapter au mieux les méthodes de suivi de la population afin de produire des estimations de taille de population fiable en vue de mettre en place des actions de conservation en lien avec le statut de la population.

Cette étude présente plusieurs objectifs. D'une part, elle vise à apporter des éléments sur l'écologie du Busard de Maillard, et en particulier sur ses paramètres de reproduction et sa phénologie jusqu'alors peu étudiée. En effet, les données historiques dont nous disposons sur l'espèce n'étaient pas suffisantes pour décrire les paramètres de reproduction de ce rapace menacé. 1) Une description précise des paramètres de reproduction collectés sera donc réalisée (date de ponte, taille de ponte, volume des œufs, taille de nichée, succès éclosion, succès reproducteur, productivité, distribution des nids) grâce aux données collectées sur des nids trouvés en milieu naturel entre 2013 et 2019. Les variables pouvant influencer ces paramètres, la période de ponte, les conditions météorologiques (pluviométrie, nombre de passage de cyclone) et la proximité des nids entre eux seront alors prises en compte. 2) Parallèlement, la phénologie de l'espèce sera évaluée à partir de focales d'observation comportementale d'individus détectés sur une zone suivie toute l'année dans le cadre de comptages mensuels. 3) D'autre part, sur la base de couples nicheurs et de l'emplacement de leurs nids respectifs, nous chercherons à étudier la détection des comportements et à évaluer les types de comportements observés selon le stade de nidification de l'espèce.

II. MATERIELS & METHODES

1. Espèce étudiée : Le Busard de Maillard

1.1. Description générale

Le Busard de Maillard est un rapace diurne d'environ 125 à 140 cm d'envergure, pour une longueur comprise entre 54 et 59 cm (Probst 1996). Comme pour les autres espèces de busard, cette espèce présente un dimorphisme sexuel inversé (DSI) avec des femelles plus grandes et plus lourdes que les mâles comme le montrent les mesures biométriques (*figure 4*) (Clouet 1978, Ferguson-Lee & Christie 2008). Notons également un dimorphisme sexuel très marqué au niveau du plumage (*figure 5*) (Clouet 1978, Ferguson-Lee & Christie 2008).

1.2. Habitats utilisés

Le Busard de Maillard est une espèce sédentaire, observée sur la majeure partie de l'île en dehors des zones fortement urbanisées ou sans végétation et qui semble, qui plus est, n'avoir aucune préférence marquée pour une région particulière (Bretagnolle *et al.* 2000, Grondin & Philippe 2011). Les derniers recensements nous informent de la présence de couples depuis le niveau de la mer jusqu'à 1800 mètres d'altitude. Les couples sont concentrés dans les vallées basses, le long des ravines et autres zones escarpées (Bretagnolle *et al.* 2000). Le Busard de Maillard occupe différents milieux. L'un des facteurs déterminants pour son choix d'habitat semble principalement lié à l'abondance et à l'accessibilité de ses proies (Bretagnolle *et al.* 2000a, Bretagnolle *et al.* 2000b).

1.3. Régime alimentaire

La diversité des proies consommées est relativement importante soulignant l'opportunisme de l'espèce. La majorité de son alimentation est constituée de rongeurs, d'oiseaux et en quantité moindre de reptiles et de petits mammifères (Rochet *et al.* 2000, Clouet 1978). Le Busard de Maillard peut également être charognard (Grondin & Philippe 2001). Plus rarement, il consomme des batraciens, des insectes et des poissons (Maillot & Baret 2017).

1.4. Reproduction

Contrairement à de nombreuses espèces d'oiseaux avec une période de reproduction bien définie, les observations anciennes semblent présenter un étalement des comportements de reproduction sur presque une année. La construction du nid se fait entre décembre et juillet ; la ponte et l'éclosion entre janvier et août et l'envol des jeunes a lieu entre février et décembre.

Mesure	Mâle	N	Femelle	N
Longueur ailes pliées (mm)	355.2± 5.9	15	364.71 ± 39.8	7
Longueur tarse (mm)	82.73 ± 3.3	15	86.03 ± 3.2	7
Masse (gramme)	540.6 ± 34.6	15	715.14 ± 58.1	7

Figure 4 : mesures biométriques (mm) et poids (g) moyens chez les adultes de Busard de Maillard. Données issues de la SEOR 2000-2018



a) femelle adulte : plumage brun-clair uniforme sur le dessus, la poitrine est blanche tachetée de flammèches brunes, avec un croupion blanc

b) mâle adulte : plumage blanc et noir, la tête, le dos et les extrémités des ailes, noirs contrastent fortement avec le ventre blanc et la queue gris-clair

c) juvénile : plumage brun-foncé avec un croupion chamois mêlé de roux ; la transition vers le plumage de type adulte est acquis dès la deuxième année, puis celui-ci va évoluer progressivement suivant le sexe des individus. Un plumage intermédiaire dit « immature » est visible dès leur première année de vie

Figure 5 : dimorphisme de plumage chez le Busard de Maillard

L'activité reproductrice est à son maximum de mars à juillet avec une baisse de septembre à décembre (Rochet *et al.*, 2000 n=30, Gonin 2001 n=14, Clouet 1978 n=7, Cheke 1974 n=3) (*figure 6*). En 2014, une nouvelle étude réalisée au nord-est de l'île montre peu de concordance avec les résultats des autres auteurs ; peu de pontes au mois d'avril (4/11) (Valette 2013, n=11). Cependant les premières études sur la phénologie de reproduction ont été réalisées avec des échantillons faibles, sur des sites localisés et seulement sur une année. Comme la majorité des busards, l'espèce niche au sol, le nid est constitué d'un amas de branches d'environ 60-70 cm de diamètre avec une cuvette centrale de 20-25 cm, il arrive exceptionnellement qu'il soit surélevé (Clouet 1978) (n=7). Les œufs au nombre de 1 à 3 sont couvés pendant 33 à 36 jours et les jeunes quittent le nid après leur 45^{ème} jours. Le Busard de Maillard pourrait tendre à être semi-colonial³ (Clouet 1978, Gonin 2001, Grondin & Philippe 2011). La productivité annuelle a été calculée plusieurs fois sur des suivis de durée et localisation différentes. Selon les auteurs et les définitions⁴, il varierait alors de 0,4 (n=11, Valette 2013) à 1,4 (n=5, Clouet 1978) en passant par 1,2 (n=30, Rochet *et al.* 2000 ; n=14, Gonin 2001) jeunes par couples.

2. Site d'étude

2.1. L'île de La Réunion

La Réunion est une île de l'ouest de l'Océan Indien située dans l'hémisphère sud et d'une superficie de 2 512 km². Cette île est située dans l'archipel des Mascareignes à 684 km à l'est de Madagascar et à 172 km à l'ouest-sud-ouest de l'île Maurice. Il s'agit d'une île volcanique, créée par un point chaud culminant à 3 071 m au Piton des Neiges. La Réunion présente un relief escarpé, travaillé par une érosion très marquée. Bénéficiant d'un climat tropical d'alizés maritimes et située sur la route des cyclones, l'île possède de nombreux microclimats et une riche diversité de milieux naturels définis en 19 habitats types par Strasberg *et al.* 2000 (*annexe 2*).

2.2. Site d'étude de Bras-Panon

La zone d'étude, d'une superficie de 26 km², est située dans les hauteurs de la commune de Bras-Panon, à l'est de l'île de La Réunion où la pression anthropique est forte sur la zone basse, puis diminue progressivement avec la distance à la côte. Elle est située entre 0 et 400m d'altitude et constitue une interface entre milieux urbains, agricoles et forêt secondaire, où les habitats naturels sont fortement modifiés. Des milieux plus préservés persistent dans les hauts de la zone avec les bas de la Forêt de l'Eden, initialement composées de végétation primaire (*figure 7*).

³ Espèce qui peut nicher en colonies mais aussi en couples isolés

⁴ Valette : nombre de jeune volant sur tous les nids trouvés même sans ponte. Clouet, Rochet, Gonin : nombre de jeune volant par nid avec ponte.

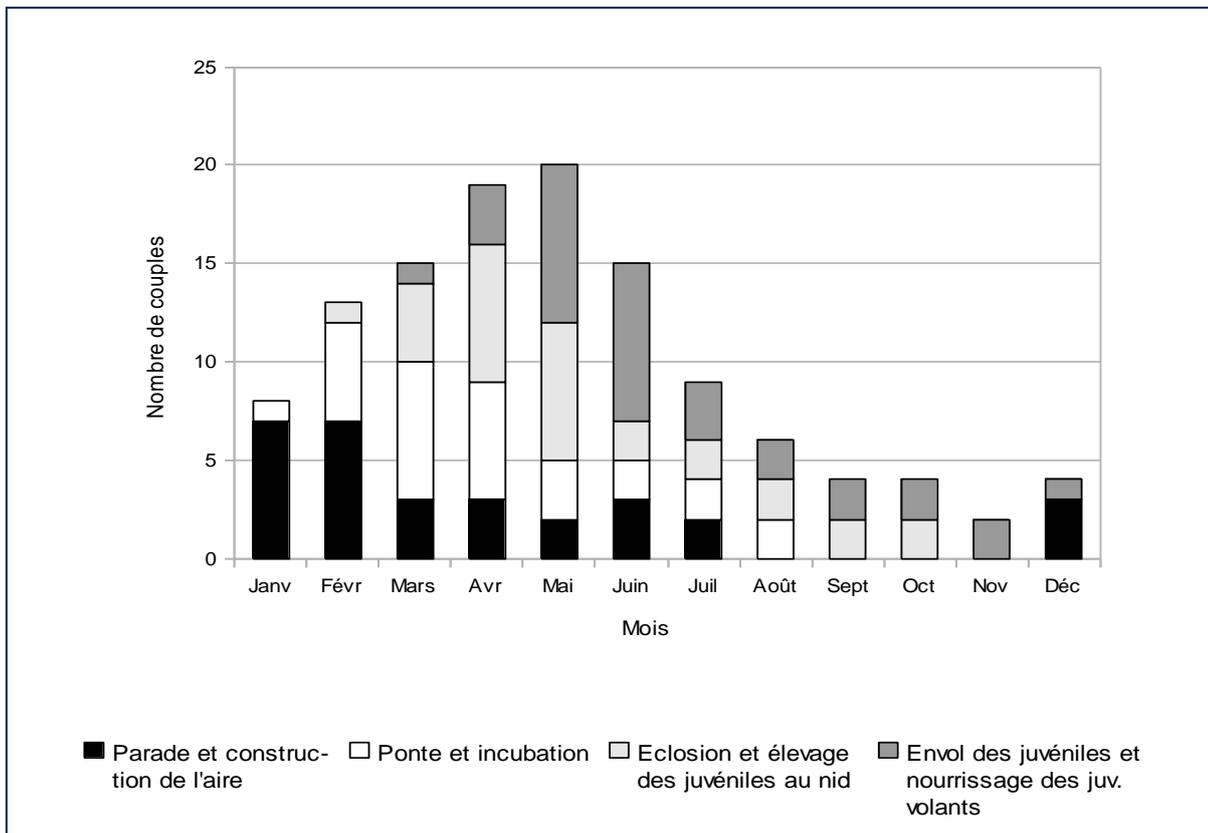


Figure 6 : phénologie de reproduction du Busard de Maillard (n=14), en ordonnée le nombre de couples est égal au cumul des activités observées sur les 14 couples suivis (Gonin 2001)

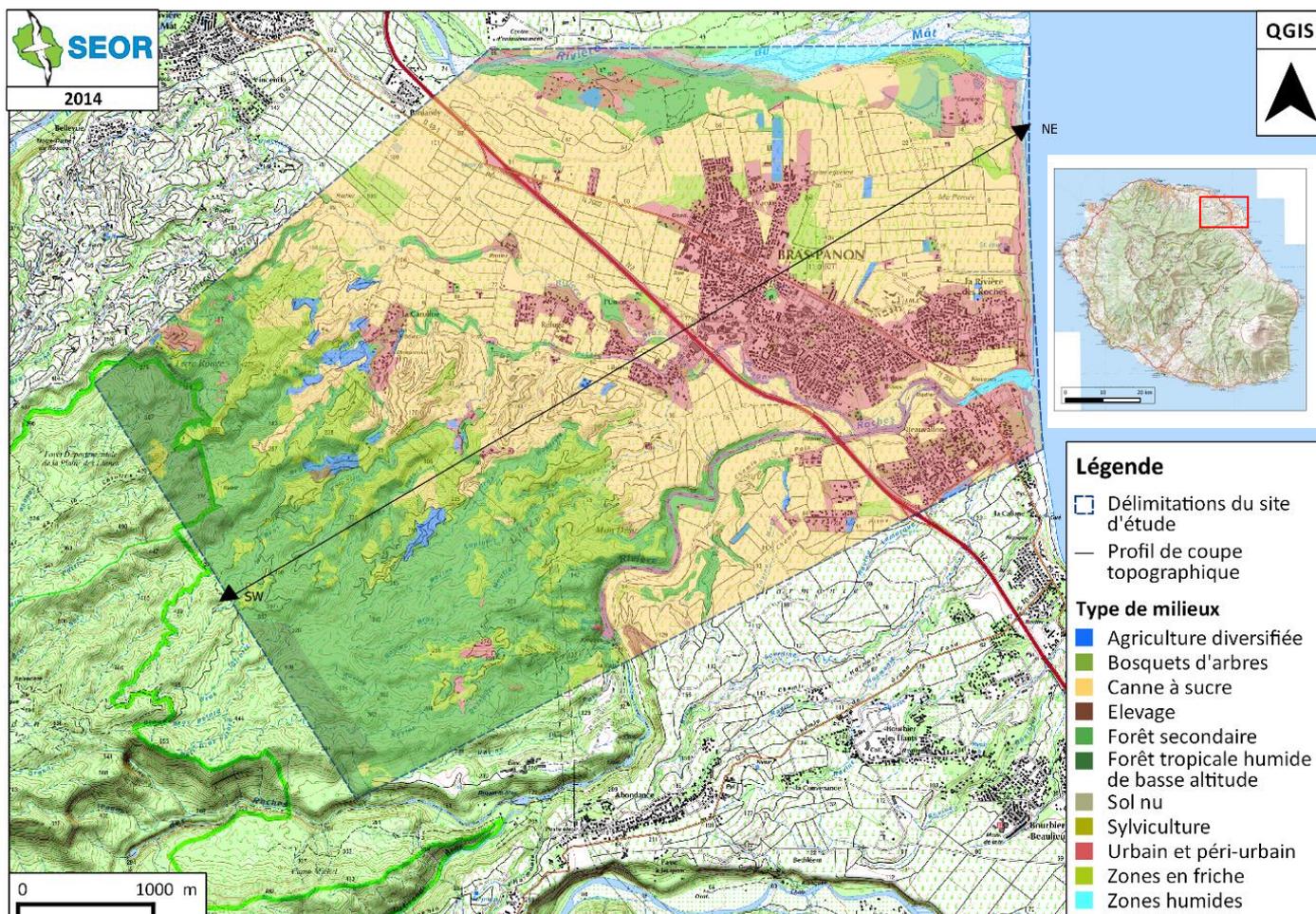


Figure 7 : délimitation schématique, occupation des sols et coupe topographique du site d'étude sur la commune de Bras-Panon. Les valeurs de la coupe topographique Sud-ouest (SW)/Nord-est (NE) représentent la longueur du profil de coupe (en abscisse) et l'altitude (en ordonnées) en mètres. Sources : GoogleEarth®, IGN-BDTopo, FEDER SEOR.

Cette zone a été choisie car elle a déjà fait l'objet de plusieurs études sur le Busard de Maillard (Gonin 2001, Grondin & Philippe 2001, Valette 2013). La zone basse présente des sites de nidification et de chasse pour le busard. De plus, les observations y sont fréquentes jusqu'en bord de mer. Les milieux sont globalement accessibles via les pistes et sentiers forestiers, ce qui permet d'exercer une pression de relativement homogène à l'échelle du site.

3. Acquisitions et descriptions des données

Deux protocoles de suivis ont été mis en place sur le site d'étude de Bras-Panon afin de répondre aux objectifs.

3.1. Phénologie de reproduction

L'objectif de ce protocole est d'évaluer la phénologie de reproduction de l'espèce en quantifiant l'ensemble des comportements des oiseaux reproducteurs, répété de manière mensuelle à bimensuelle. Pour ce faire, entre 13 et 15 postes d'observation (*annexe 3*) ont été disposés sur des points culminants de la zone d'étude et définis selon différents critères tels que l'accessibilité, la visibilité, la limitation du chevauchement des zones d'observations entre deux postes, ou encore la localisation historique de couples reproducteurs. Bien que le protocole ait pu se voir ajuster entre les années (i.e. 2016 / 2017 / 2018-2019 ; *tableau 1*) avec des temps d'observation variant mensuellement de 30 à 120 minutes par poste, les éléments collectés sur le terrain étaient du même ordre. Ceci a permis de constituer une base de données commune, après un travail d'homogénéisation des données recueillies par année. Les suivis sont réalisés de préférence en matinée (8h00-12h30) excepté en 2016, année durant laquelle les observations pouvaient s'étaler tout au long de la journée, voir éventuellement en fin d'après-midi (jusqu'à 30 min avant le coucher du soleil). Ainsi à l'arrivée sur son poste, l'observateur renseigne systématiquement le numéro du poste d'observation, la date et son nom/prénom. La durée totale par poste d'observation était entre coupée en focales d'observation de 5 min type « focale sampling et scan sampling » (Altmann 1974) (*tableau 1*) ; période durant laquelle, l'observateur renseigne des éléments propres à chaque session (conditions météorologiques, heure du début de la focale, nombre et types de comportements reproducteurs de chaque individu identifié défini selon une classification adaptée à l'espèce, permettant par la suite, de les regrouper en 3 grandes classes de probabilité de nidification (*tableau 2*). À la fin d'une session de 5 min, une fois l'ensemble des individus saisi, l'observateur débute une nouvelle focale où toutes ces informations sont de nouveau renseignées. La saisie est réalisée sur des feuilles et cartes de terrain pour 2016 et une partie de 2017, une interface de saisie simplifiée a, par la suite, été créée afin de centraliser et faciliter l'acquisition et la spatialisation des données grâce à l'utilisation d'un ordinateur de terrain et du logiciel gratuit CyberTracker©.

ANNEES	Protocole, nombre de focales	Fréquence	Nombre de postes	Durée annuelle d'observation (en min)
2016	Focales de 30 puis 60 minutes	1 fois/mois	15	4315
2017	12 focales de 5 minutes	2 fois/mois	15	11925
2018	24 focales de 5 minutes	1 fois/mois	14	16970
2019	24 focales de 5 minutes	1 fois/mois	13	4030

Tableau 1 : modification du protocole relatif au suivi de la phénologie de reproducteurs du Busard de Maillard de 2016 à 2019

Type de comportement	Définition	Interprétation
Passage de proie Transport de proie Sollicitation juvénile	Echange de proie entre un adulte et un jeune ou entre un mâle et une femelle. Déplacement d'un mâle ou d'une femelle avec une proie. Sollicitation d'un adulte par un jeune.	Couple nicheur certain
Interaction/vol de couple Transport de matériel Copulation Parade (2) Cri alarme	Vol d'un mâle et d'une femelle avec interaction (simulation de passage de proie, prise de serres). Mâle ou femelle transportant des matériaux pour la construction du nid. Copulation entre un mâle et une femelle. Parade ensemble d'un mâle et d'une femelle. Cri d'alarme émis par un mâle ou une femelle à l'encontre d'un intrus.	Couple nicheur probable
Pose sol Sollicitation mâle Défense de territoire Parade (1)	Adulte gagnant, occupant ou quittant le site d'un nid potentiel. Cris stridents répétés par une femelle. Piqué d'un mâle ou d'une femelle sur un intrus puis accompagnement hors du territoire. Parade d'un individu seul.	Couple nicheur possible

Tableau 2 : description des comportements reproducteurs observables chez le Busard de Maillard et probabilité de nidification associée.

3.2. Protocole de suivis de la nidification

Les suivis ont été réalisés de 2013 à 2019 pendant la période de reproduction avec un effort de prospection variable selon les années. Une fois un nid potentiel localisé suite aux comportements révélateurs d'un couple nicheur lors des prospections depuis un poste d'observation ou via une observation *ad-libitum*, il est alors localisé précisément par la méthode de l'alignement⁵. Une fois l'alignement validé par une seconde observation, une visite est alors programmée rapidement sur le nid pour définir le stade de reproduction/nidification du couple. Lors de cette 1^{ère} visite, l'observateur enregistre une position GPS et relève les caractéristiques du nid (hauteur, diamètres interne et externe, sa composition) et celle du milieu présent dans ses alentours proches. Selon le contenu présent dans le nid des mesures biométriques spécifiques seront alors effectuées sur les œufs et/ou les poussins (*tableau 3*). Une visite de contrôle suivante peut éventuellement être programmée afin de valider le succès d'envol des jeunes. Notons que depuis 2019, un suivi par drone a débuté. La 1^{ère} visite se fait par drone afin de contrôler le stade de nidification avant de se rendre à pied sur le nid pour y effectuer les premiers relevés. Cette technique permet de limiter la perturbation non intentionnelle ainsi qu'un gain de temps considérable au regard de l'accessibilité de ces derniers à pied. Des nids en dehors de la zone d'étude ont aussi été trouvés et suivis.

4. Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel RStudio (version 1.2.1335 / version de R 3.6.0) et QGIS logiciel de Système d'Information Géographique (version 2.18.16).

4.1. Estimation des paramètres reproducteurs

4.1.1 Période de ponte

Les dates de ponte, exprimées en jour julien⁶, ont été estimées par différentes méthodes. 1) À partir de la date d'éclosion relevée sur le terrain (n=3) à laquelle a été soustraite la durée moyenne d'incubation (35 jours). 2) À partir de mesures biométriques prises sur les poussins (longueur du tarse, longueur de l'aile pliée et masse) (n=27). Ces mesures permettent d'estimer l'âge des poussins depuis l'éclosion ([Bortolotti 1984](#)). N'ayant pas un nombre assez élevé de poussins avec la date d'éclosion connue (n=3), il n'a pas été possible de calibrer une courbe de croissance spécifique aux poussins de Busard de Maillard.

⁵ Après observation de comportement reproducteur, l'observation est prolongée et répétée jusqu'à ce qu'un ou les deux individus se posent sur une zone. L'endroit précis est alors pris en photo et pointé sur une carte.

⁶ Le jour julien est la base d'un système de datation consistant à compter le nombre de jours et fraction de jour écoulés depuis une date conventionnelle fixée par exemple au 1^{er} janvier.

Stade du nid	Actions effectuées
Vide	-
Œuf 	Pesés, mesurés et annotés à l'aide d'un crayon à papier afin qu'ils soient identifiables lors de la visite ultérieure.
Post éclosion 	La masse des poussins et la longueur de l'aile pliée et du tarse sont aussi mesurées afin d'évaluer la vitesse de développement des individus, et de planifier la date de marquage avant envol. Les poussins sont également photographiés.
Poussin, stade 21-35 jours 	Reprise des mesures habituelles et baguage si les poussins ont 15-20 jours et/ou que le tarse est assez développé (Programme Personnel de baguage n°577, MNHN).
Poussin, stade 36-45 jours 	Mesures biométriques complémentaires, marquage alaire, prélèvement de sang, de plumes, de fèces et pose éventuelle de GPS.

Tableau 3 : description des mesures prises sur le contenu d'un nid de Busard de Maillard en fonction du stade de nidification lors du suivi de la reproduction. Crédit photos : SEOR

Nous avons alors utilisé les formules issues de la courbe de croissance des poussins des Busards des Roseaux (*tableau 4*) ([Blanc 2012](#)), une espèce relativement proche phylogénétiquement et corporellement (*annexe 4*). Enfin, nous avons utilisé les données de densité des œufs ($n=10$). La densité de l'œuf décroît au fur et à mesure que l'embryon se développe. À partir de sa perte de poids quotidienne on peut estimer le temps d'incubation, et ainsi en déduire la date de ponte ([Sternalski et al. 2010](#)). La formule de la courbe d'évolution de la densité de l'œuf du Busard des Roseaux en fonction des jours d'incubation a été utilisée (*tableau 4*) ([Blanc 2012](#)). Cette méthode apparaît relativement précise puisque sur les 3 œufs ayant une date d'éclosion connue et donc une date de ponte proche de la réalité, l'estimation de la date de ponte grâce à cette courbe donne une différence de -2 jours ($n=2$) et -5 jours ($n=1$).

4.1.2 Paramètres de reproduction étudiés

- le succès reproducteur : nombre de jeunes à l'envol / nombre d'œufs pondus ;
- la taille de ponte : nombre d'œufs par nid, (analyses basées sur les pontes complètes) ;
- la productivité : nombre de jeunes à l'envol par couple ayant pondu au moins un œuf ;
- le succès d'éclosion : nombre d'œufs éclos / nombre d'œufs pondus ;
- œufs clairs : nombre d'œufs retrouvés clairs / nombre d'œufs non éclos
- le succès à l'envol : nombre de jeunes à l'envol / nombre d'œufs éclos

4.1.3 Biométrie des œufs

Les mesures biométriques sur les œufs ont permis de calculer leur volume grâce à la méthode d'[Hoyt \(1979\)](#) : volume (en cm^3) = $0.51 \times \text{longueur (en cm)} \times \text{largeur (en cm)}^2 / 1000$ ainsi que leur densité (volume/masse). Lorsque des œufs non éclos sont retrouvés clairs, ils sont prélevés et ouverts afin d'évaluer s'il y a eu un développement embryonnaire.

4.1.4 Distribution des nids et utilisation des zones de nidification

Une analyse spatiale de la distribution des nids permet de décrire le patron de distribution et d'en déduire éventuellement le type de système de reproduction (territorial, semi-colonial, etc). L'analyse de cette distribution a été faite avec la méthode de la distance au plus proche voisin dans un rayon de 500m. Une analyse des oiseaux marqués et des nids sélectionnés au cours des années est réalisée afin de définir la fidélité des zones de nidification.

4.1.3 Variables explicatives

Pour analyser les facteurs qui peuvent influencer les paramètres reproducteurs, nous avons utilisés des Modèles Mixtes Linéaires Généralisés avec le package « lme4 » (GLMM, [Bates et al. 2017](#)) et des Modèles Mixtes Additifs Généralisés avec le package « mgcv » (GAMM, [Wood 2006](#)). Les variables à expliquer testées sont les paramètres reproducteurs (cf : partie 4.1.2). L'année est incluse dans les modèles en tant qu'effet aléatoire (facteur à 7 niveaux).

Biométrie poussin	Formules utilisées
Longueur de l'aile pliée (LP)	$((18.7459((-LN((282.7-(LP))/(LP))))/0.1531)$
Longueur du tarse (LT)	$((9.5306-((LN((87.9465-(LT))/(LT))))/0.162))$
Masse (M)	$((10.5463((-LN(LN(672.2/(M))))/0.1392))$
Biométrie œuf	Formule utilisée
Densité (masse/volume)	$(=-134.56*(densité)+152.19)$

Tableau 4 : formules issues de la courbe de croissance des poussins de Busard des Roseaux et courbe de croissance de la densité d'œufs du Busard des Roseaux en fonction des jours d'incubation (Blanc 2012).

Compte tenu de la taille d'échantillons limitée, les variables explicatives ont été testées indépendamment les unes des autres (*tableau 5*).

4.2 Etude de la phénologie de reproduction

Pour analyser la phénologie de reproduction nous avons utilisé des Modèles Additifs Généralisés (GAMM, [Wood 2006](#)) avec une distribution Tweedie. Les variables à expliquer sont la somme des observations de chaque type de comportements reproducteur (*tableau 2 ; page 9*) relevés lors de chaque session, allant de 30 à 120 min. issus du protocole de suivi de la phénologie de la reproduction. Plusieurs variables sont testées en effet fixe et certaine en effet aléatoire (fonction $s(x, bs = 're')$) (*Tableau 6*). La date exprimée en jour julien est modélisée via une spline cyclique (fonction $s(x, bs = 'cc')$) permettant de tenir compte du fait que les comportements observés fin décembre (jour julien = 365) et début janvier (jour julien = 1) sont proches d'un point de vue temporel. Notons que pour chacun des comportements, nous avons créé un modèle en utilisant une fonction permettant de prendre en compte l'effet « année » de manière aléatoire. Le logarithme de la durée de la session a été inclus en offset permettant de prendre en compte qu'un comportement donné sera observé a priori plus fréquemment lorsque la durée de l'observation est plus longue. Les modèles sont ensuite comparés grâce à une mesure de la qualité de ces derniers, l'AIC (Akaike Information Criterion). Le modèle ayant le plus faible AIC a alors été conservé pour étudier l'effet des variables explicatives retenues.

4.3 Évaluation des types de comportements détectés selon le stade de nidification

L'analyse des types de comportements observés selon le stade de nidification est réalisée en mettant en lien les deux jeux de données. Pour ce faire, des zones de couvertures visuelles sur chaque point d'observation ont été délimitées sur le terrain puis cartographiées afin de pouvoir identifier les nids observables depuis les points d'observations. Puis les comportements associés à un nid sont sélectionnés lorsqu'il n'y a qu'un seul couple sur la zone d'observation. Une analyse descriptive du stade des nids concernés (ébauche, incubation, poussin, jeune volant, échec) et des comportements observés par période a été réalisée en prenant en compte les durées d'observations selon le stade de nidification (*tableau 7*). Des GAMM, ([Wood 2006](#)) ont de nouveau été utilisés pour savoir si nous détectons un effet de la date depuis la ponte sur les comportements observés, en prenant comme effet aléatoire, l'identifiant du nid. Toujours dans un souci méthodologique et sachant que la présence de nids était avérée sur ces zones couvertes visuellement, nous avons alors étudié la durée moyenne à partir de laquelle les premiers comportements révélant un couple reproducteur étaient détectés lors des focales d'observations ; ceci pour chacun des stades du nid.

Variables explicatives	Description
Date de ponte	Date de ponte estimée en jour julien
Période	deux périodes définies ; de janvier à avril et de mai jusqu'à la fin de l'année, mai étant la première période de l'année de campagne de dératisation
Distance au plus proche voisin	Distance en mètre du nid le plus proche
Cumul de précipitation par mois	Cumul en millimètres de pluie, données issues du réseau météorologique CIRAD/Météo-France.
Nombre de cyclone par mois	
Volume des œufs	Volume calculé en cm ³
Taille de ponte	0-3

Tableau 5 : variables explicatives retenues pour l'étude de leur effet sur les variables à expliquer (paramètres reproducteurs) à partir des modèles GLMM et GAMM.

Variables explicatives	Description
Minutes écoulées depuis le lever de soleil	Heure de début de la focale en minutes écoulées depuis le lever de soleil
Vent	0 : Pas de vent 1 : Vent faible 2 : Vent fort
Nuage	Couverture nuage de 0 à 100%
Pluie	0 : Pas de pluie 1 : Pluie
Année	2016 à 2019
Point d'observation	12 points d'observation différents

Tableau 6 : variables prises en compte pour l'analyse de la phénologie de reproduction du Busard de Maillard dans les Modèles Additifs Généralisés (GAMM)

Stade du nid	Description	Durée d'observation en minutes	Nombre de nids suivis	Nombre de comportements identifiés
Ebauche	Construction du nid, 0 à 60 jours avant la ponte	6 537	16	329
Œuf	0 à 35 jours depuis la date de ponte	651	5	45
Poussin	35 à 80 jours depuis la date de ponte	858	6	52
Jeune volant	De 80 à 260 jours après la date de ponte	2 424	5	141
Echec	Echec après ponte ou éclosion jusqu'à la nouvelle saison de reproduction	2 406	3	183
Total tout stade confondu		12 876	35	750

Tableau 7 : description des différents stades de nids et occurrence des observations comportementales associées pour l'analyse des comportements reproducteurs du Busard de Maillard.

III. RESULTATS

1. Paramètre reproducteur

Le suivi des nids a permis d'identifier 88 nids depuis 2013. Tous les nids n'ayant pas été trouvés au même stade (par exemple stade « œufs » ou stade « jeunes »), les effectifs pour chaque paramètre ne sont pas les mêmes. Sur 24 nids découverts au stade d'ébauche, 96 % d'entre eux n'ont pas amené à une ponte et seul un d'entre eux a produit un jeune volant.

1.1 Période de ponte, taille de ponte et éclosion

D'après les résultats, la ponte chez le Busard de Maillard est étalée sur 9 mois de l'année, de fin décembre/début janvier jusqu'à la fin du mois d'août (*figure 8*). La période de ponte la plus importante est observée en début d'année, de janvier à avril, avec un pic en février ; ainsi la moitié des pontes a eu lieu avant avril. On note ensuite une baisse d'activité à partir du mois de mai jusqu'à fin août pour les pontes les plus tardives. La taille de ponte du Busard de Maillard varie de 1 à 3 œufs avec une moyenne de 2.38 ± 0.66 œufs ($n=31$). La taille de ponte n'est pas influencée significativement par la date de ponte ($p=0.97$, $n=28$) ou par la distance au nid voisin le plus proche ($p=0.65$, $n=26$). Les dates d'éclosion observées ($n=46$) sont étalées sur l'année, de février à octobre. Les premières éclosions ont lieu début février. La moitié des éclosions a eu lieu entre début février (26%) et fin mars (28%) logiquement lié au pic de ponte. On note un deuxième pic d'éclosions en mai et en juillet cumulant 20% des éclosions sur ces deux mois. Au mois de juillet, 90% des éclosions avaient eu lieu. On note cependant que plus d'un œuf sur deux (57%) ne sont pas arrivés à éclosion (succès éclosion 0.43, $n=56$). L'analyse de l'effet de la date de ponte sur le succès d'éclosion n'a pas montré d'effet significatif ($p=0.84$, $n=49$) tout comme l'effet de la période ($p=0.9$, $n=47$). Soulignons que tous les œufs non éclos et retrouvés clairs n'ont montré aucun signe de développement embryonnaire après examen ($n=10$). Nous avons testé les variables qui auraient pu expliquer la découverte de ces œufs clairs, aucune des variables testées ne présente un effet significatif (*tableau 8*). On note aussi des œufs non-éclos avec des traces de prédation ($n=3$).

1.2 Succès reproducteur

Le succès de reproduction moyen est de 0.28 ± 0.35 jeunes volants par œuf pondu. Le résultat des analyses des variables explicatives nous montre qu'il n'y a pas d'effet significatif de la date de ponte sur le succès reproducteur (unité de jeune par œuf pondu) ($p=0.74$, $n=27$). La productivité de jeunes à l'envol par couple ayant pondu au moins un œuf est de 0.67 ± 0.83 (range 0-2). Cette productivité n'est pas non plus significativement influencée par la date de ponte ($p=0.67$, $n=27$).

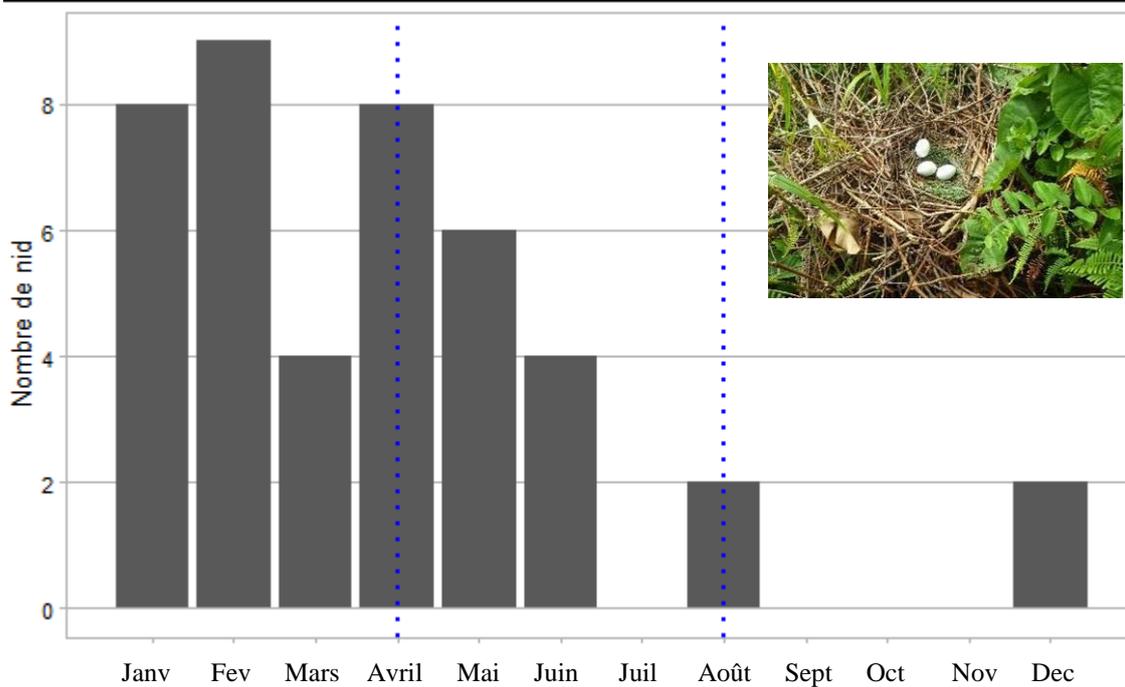


Figure 8 : phénologie de ponte (n= 41) du Busard de Maillard exprimée en mois. NB : les lignes verticales représentent les dates de ponte des nids trouvés au sud de l'île (n= 3).

Variable à expliquée	Variables explicatives	N	Modèle mixte utilisé	Famille	P	Intercept
Succès reproducteur	Date de ponte	26	GAMM	Binomiale	0.744	
	Distance	23	GAMM		0.0811	
	Cumul de précipitation	27	GLMM		0.0885	
Taille de ponte	Date de ponte	28	GAMM	Poisson	0.974	
	Distance	26	GAMM		0.625	
	Volume	54	GLMM		0.659	
Productivité	Date de ponte	26	GAMM	Poisson	0.670	
	Distance	27	GLMM		0.229	
Succès envol	Date de ponte	41	GAMM	Binomiale	0.5636	
	Distance	34	GAMM	Binomiale	0.154	
Succès éclosion	Date de ponte	49	GLMM	Binomiale	0.839	-7.8261
	Période	47	GLMM		0.9	
	Distance	56	GLMM		0.828	
	Volume	49	GLMM		0.0442	
Œufs clairs	Date de ponte	23	GAMM	Binomiale	0.679	
	Période	23	GLMM		0.438	
	Volume	26	GLMM		1	

Tableau 8 : résultats des modèles GLMM et GAMM retenue pour l'analyse des paramètres reproducteurs chez le Busard de Maillard

La survie des poussins après éclosion jusqu'à l'envol est de 0.77 ± 0.27 ($n=43$) (nombre de jeunes volants / nombre de poussins au nid), de nouveau, la date de ponte ne montre pas d'effet significatif sur la survie des poussins ($p=0.56$, $n=39$).

1.3 Biométrie des œufs

Le volume moyen des œufs est de $34.59 \pm 3.27 \text{cm}^3$. Il n'y a pas d'effet significatif de la date de ponte sur le volume des œufs ($p=0.66$, $n=54$). On observe cependant un effet significativement positif du volume de l'œuf sur la probabilité que cet œuf éclore ($p=0.034$, $n=49$) ; autrement dit lorsque le volume de l'œuf augmente, la probabilité d'éclosion augmente (*figure 9*). Il n'y a pas de relation significative entre le volume et le fait qu'un œuf soit retrouvé clair (ne présentant pas de développement embryonnaire) ($p= 1$, $n=26$).

1.4 Distribution spatiale des nids

La distance minimum entre les nids est de 105 mètres avec des nids isolés jusqu'à 2391m. (*figure 10*). La moitié des nids disposent d'un autre nid à proximité immédiate (< 500 mètres). Soulignons que sur un rayon de 500 mètres, il peut y avoir jusqu'à 4 nids. La moyenne de la distance entre les nids est de 575.9 ± 409.13 mètres, cette moyenne étant influencée par les nids très éloignés, la médiane, elle, est de 489 mètres. Bien que non significative, nous observons une tendance de la distance sur le succès reproducteur ($p= 0.079$, $n=23$), avec un succès reproducteur qui augmente lorsque les nids sont espacés de 300 à 800 mètres d'un autre nid. Il semble y avoir une baisse de ce succès pour ceux qui sont plus éloignés (à plus de 800 mètres d'un autre nid)⁷.

1.5 Utilisation des zones de nidification

Une analyse spatiale des comportements d'oiseaux marqués nous a permis d'identifier plusieurs comportements de nidification et d'avoir des premiers éléments sur la réutilisation des zones de nidification. Un individu (femelle VV/RR) suivi pendant 3 années consécutives a réutilisé le même nid en 2017 et 2018, puis l'année suivante a niché dans un nouveau nid à environ 200 mètres du précédent.

⁷ Le succès reproducteur des nids est analysé sur des nids où les périodes de reproduction peuvent être comprises en 1 et 4 mois entre les nids de la ponte à l'envol

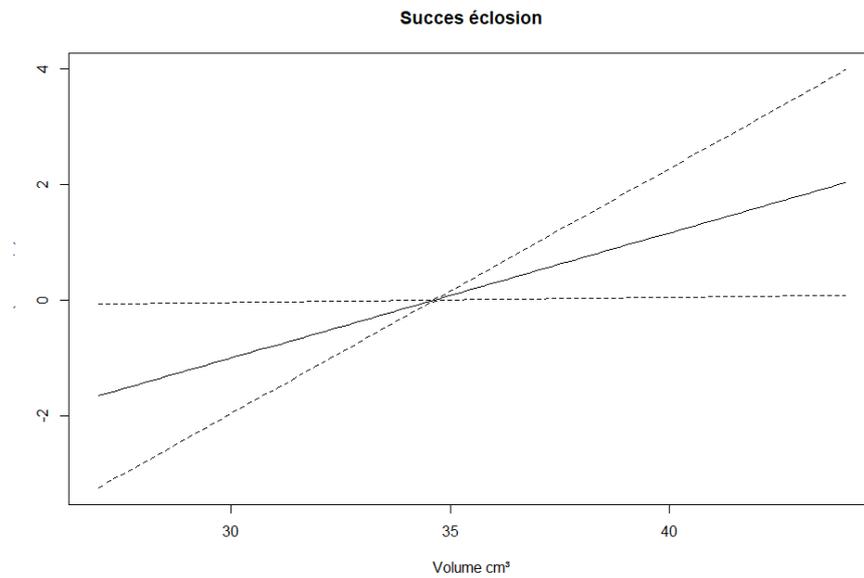


Figure 9 : résultat du modèle mixte généralisé (Succès éclosion ~ Volume, effet aléatoire = année). On observe un effet significativement positif et linéaire du volume de l'œuf sur la probabilité que cet œuf éclore ($p=0.044$, $n=49$).

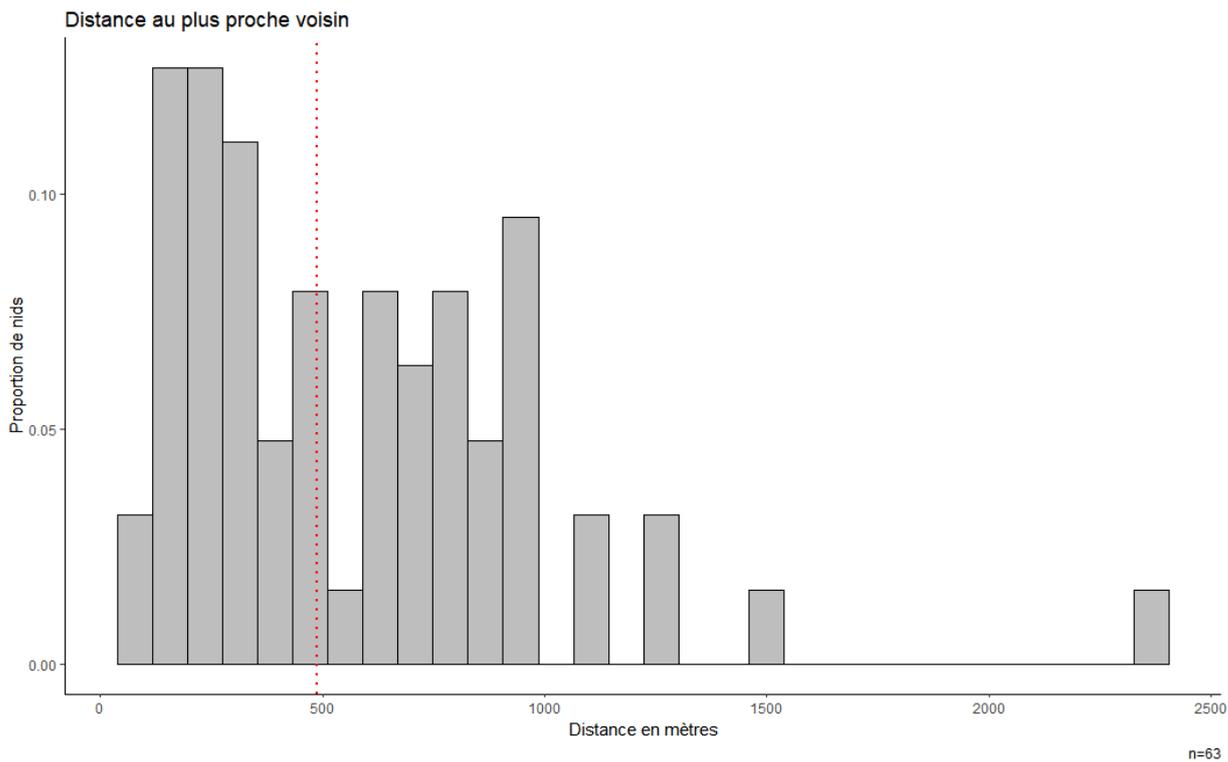


Figure 10 :- Histogramme des distances les plus proches entre les nids ($n= 63$) avec la représentation de la médiane (rouge).

Un individu (mâle RR/BB) bagué au stade poussin en 2016 a réutilisé le même nid en 2018 et 2019 situé à 160 mètres de son lieu de naissance. Un individu bagué en 2013 (R-i-J) au nid, a fait son nid 1.85 km de son lieu de naissance.

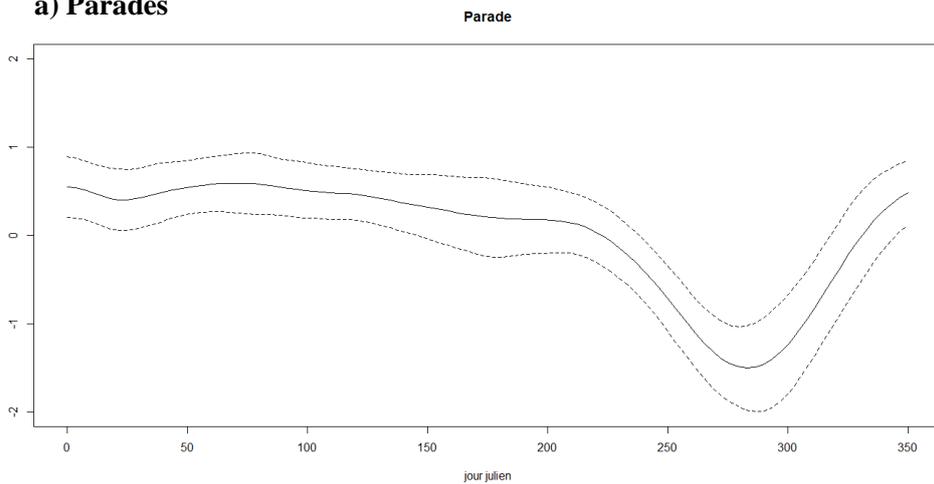
2. Phénologie de reproduction

Les résultats issus des Modèles Mixtes Additifs Généralisés (GAM) nous permettent de modéliser le cycle reproducteur de l'espèce au cours de l'année. L'activité de reproduction débute en novembre par des parades individuelles ou du couple (*cf: tableau 2*); comportements qui s'observent toute l'année de façon homogène à l'exception d'une période relativement courte, de septembre jusqu'à octobre, durant laquelle l'espèce ne présente ce type de comportements que marginalement (*figure 11a*). La construction et l'entretien des nids, détectable par l'observation de transports de matériaux, démarre en novembre pour progressivement s'accroître jusqu'à mi-août (*figure 11b*). Deux périodes distinctes marquent l'envol des jeunes (sollicitation juvénile), une première période d'avril à mai puis une deuxième période de sollicitation qui augmente de mi-juillet à début (*figure 11c*). Les interactions de couple apparaissent en lien avec le début du cycle reproducteur (novembre) bien que l'on observe peu de variations au cours de l'année avec seulement une légère diminution de ce comportement à partir de début août (*figure 11d*). Le transport de proies semble fluctuer fortement selon les années où la prise en compte des variations interannuelles de manière aléatoire permet d'obtenir un AIC bien inférieur aux autres modèles ($\Delta = 306$). A l'exception de 2018 où les transports de proies varient significativement au cours de l'année, nous n'avons pas détecté d'évolution significative du jour julien sur ce type de comportement en 2016, 2017 et 2019 ($p > 0.05$) (annexe : *figure 11e*). Notons que nous n'avons pas d'effet significatif du jour julien sur les passages de proies ($p = 0.38$). Les sollicitations des mâles par les femelles indiquent un effet de l'année, en raison d'un AIC plus faible ($\Delta = 3$) par rapport aux autres modèles sans effet aléatoire « année ». Si en 2016 et 2017, ce comportement montre peu de variation au cours de l'année, en 2018 deux pics se dessinent : l'un de février à avril, l'autre de fin mai à juillet (annexe : *figure 11f*).

3. Évaluation des types de comportements observés selon le stade de nidification

Les résultats des analyses descriptives nous apportent des premières informations sur les comportements observés en fonction des différents stades du nid. Les parades, la pose au sol et les sollicitations de mâle par les femelles associés à la catégorie « **couple possible** » sont observés pour l'ensemble des stades de nid (ébauche, œuf, poussin, jeune volant).

a) Parades



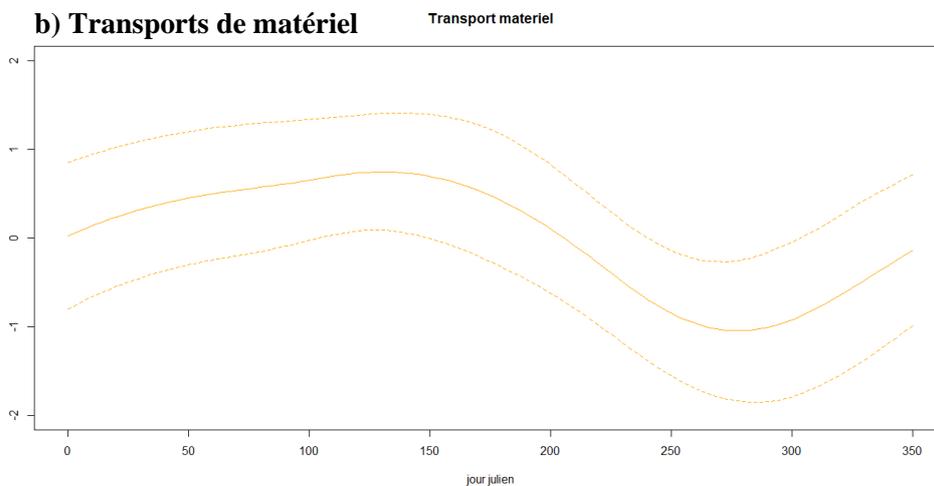
Modèle avec le meilleur AIC :

Parade ~ jour julien + minute + année + PO + nuage + vent + offset durée focale

Déviante expliquée = 37.4%

Figure 11a) : résultats du modèle GAMM pour le comportement de **parade**. On observe un effet significatif du jour julien ($p < 0.0001$), de l'heure observation ($p < 0.001$), du point d'observation ($p < 0.0001$) et des conditions météorologiques (nuage, $p < 0.01$, vent $p < 0.05$).

b) Transports de matériel



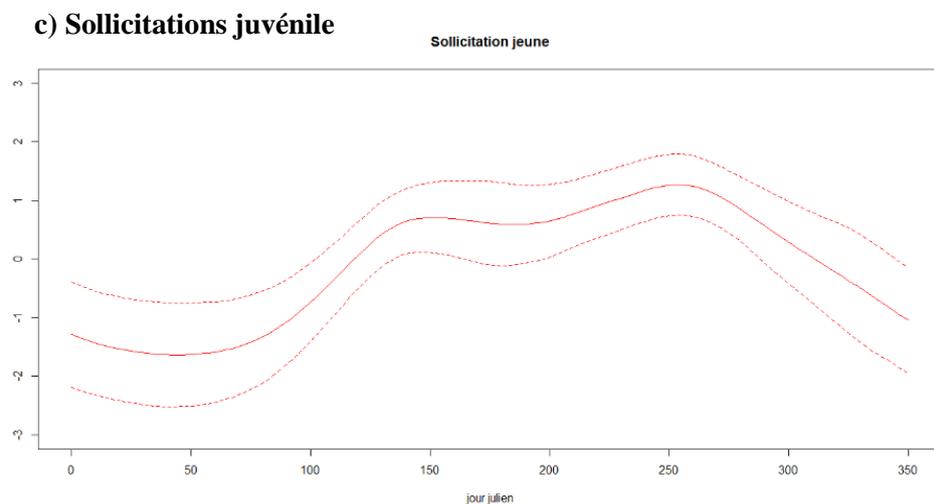
Modèle avec le meilleur AIC :

transport de matériel ~ jour julien + minute + année + PO + offset durée focale

Déviante expliquée = 26.2%

Figure 11b) : résultat du modèle GAMM pour le comportement de **transport de matériel**. On observe un effet significatif du jour julien ($p < 0.05$) et du point d'observation ($p < 0.01$)

c) Sollicitations juvénile



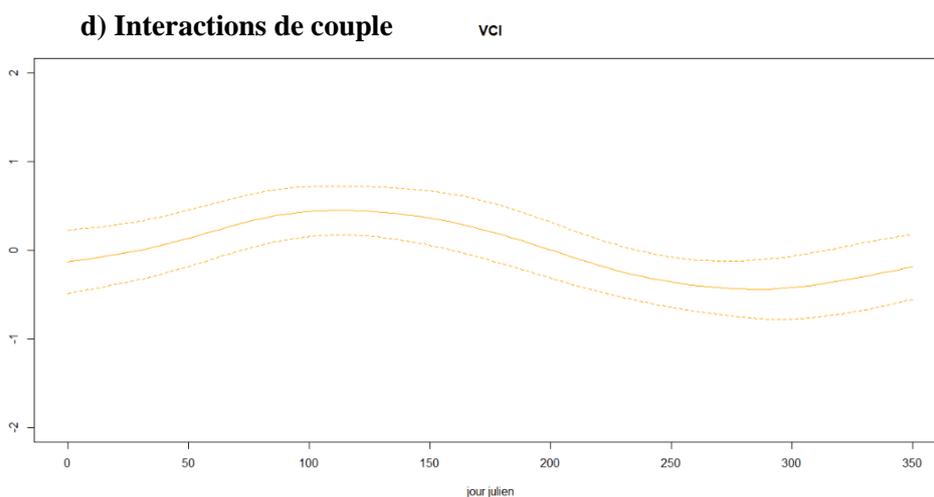
Modèle avec le meilleur AIC :

sollicitation juvénile ~ jour julien + minute + année + PO + pluie +_offset durée focale

Déviante expliquée = 38.7%

Figure 11c) : résultat du modèle GAMM pour le comportement de **sollicitation juvénile**. On observe un effet significatif du jour julien ($p < 0.0001$), du point d'observation ($p < 0.0001$) et de la présence de pluie ($p < 0.01$).

d) Interactions de couple



Modèle avec le meilleur AIC :

interaction de couple ~ jour julien + minute + année + PO + offset durée focale

Déviante expliquée = 15.2%

Figure 11d) : résultat du modèle GAMM pour le comportement de **vol de couple**. On observe un effet significatif du jour julien ($p < 0.001$) et du point d'observation ($p < 0.01$).

Ces comportements sont aussi observés après un échec de nidification au stade œuf ou poussin, avec une fréquence qui semble même supérieure notamment pour le comportement de parade et de sollicitation mâle. Les interactions territoriales peuvent quant à elles s'observer lors du stade ébauche, jeune volant ou encore après un échec (*figure 12a*). Pour la catégorie « **couple probable** », bien que très peu de copulations aient été observées (n=4), ces observations ont toutes été réalisées lors de l'ébauche du nid. Le comportement d'alarme est observé à tous les stades indiquant un « couple probable », avec cependant une fréquence plus élevée au stade poussin et après échec de la nidification. Les interactions de couples en vol peuvent s'observer à tous les stades de nids mais apparaissent plus fréquentes lorsqu'il y a des poussins au nid (*figure 12b*). Concernant les comportements révélateurs d'un « **couple certain** », le transport de proies s'observe lorsqu'il y a des nids en ébauche, mais également au stade œuf voir même après un échec de la nichée, les passages et transports de proies sont observés à tous les stades de nidification même après un échec. Les observations de sollicitation d'adultes par des jeunes ont majoritairement eues lieu lorsque les jeunes étaient volants, mais elles ont également été détectées au stade d'ébauche, poussin et même après échec de la nichée (*figure 12c*). Une analyse plus détaillée de ce comportement de sollicitation grâce aux individus marqués nous a alors permis de constater que cette sollicitation lors de l'ébauche pouvait provenir de jeunes nés dans une zone d'observation différente (éloignée d'environ 700 à 1 000 mètres du nid d'origine). De plus un autre individu a été identifié comme jeune en sollicitation alors qu'il s'agissait en réalité d'un individu de moins d'un an, né, bagué et marqué l'année précédente. L'analyse de l'effet du temps écoulé depuis la date de ponte sur chacun des comportements présente uniquement un effet significativement négatif sur le nombre de parades observées (p=0.047). En effet, il n'y a pas d'effet significatif pour le comportement de sollicitation de la femelle (p=0.256), pour le transport de matériel (p= 0.424), pour l'interaction de couple (p= 0.71) ; pour l'alarme (p=0.404) et pour le passage de proie. Les transports de proies n'ont pas pu être testés avec le modèle de GAMM car il n'y avait pas suffisamment d'observations.

Enfin, l'analyse de la détection des comportements en fonction de temps d'observation et du stade de nidification du nid est un élément intéressant pour mieux adapter les protocoles de suivis, cette analyse a été réalisé en parallèle à l'étude et nous permet d'identifier des durées minimums d'observation en fonction des comportements recherchés (*figure 13*).

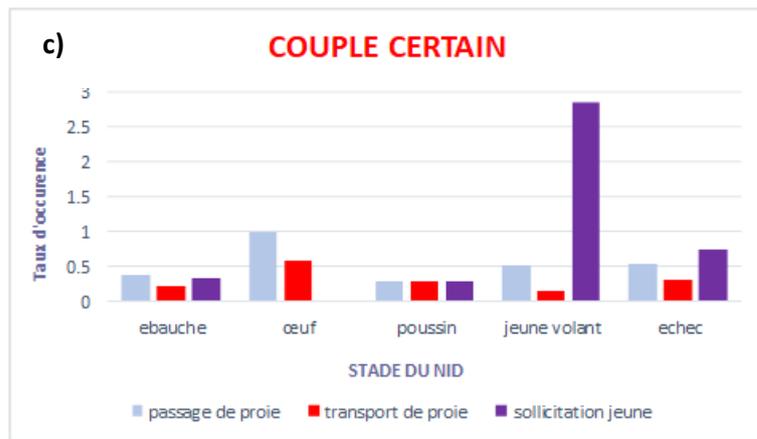
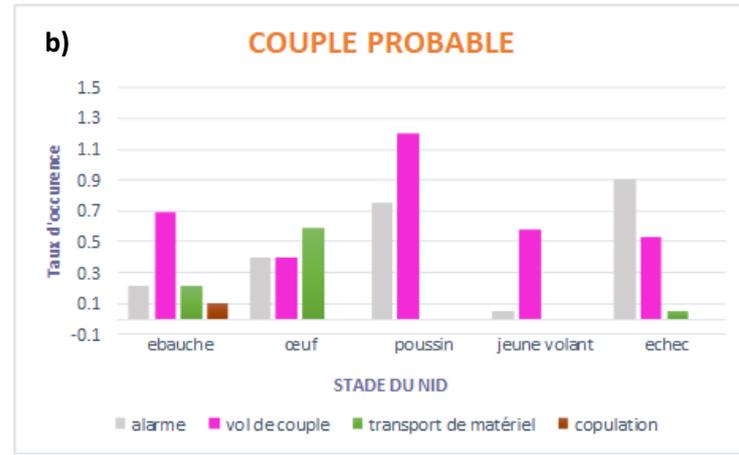
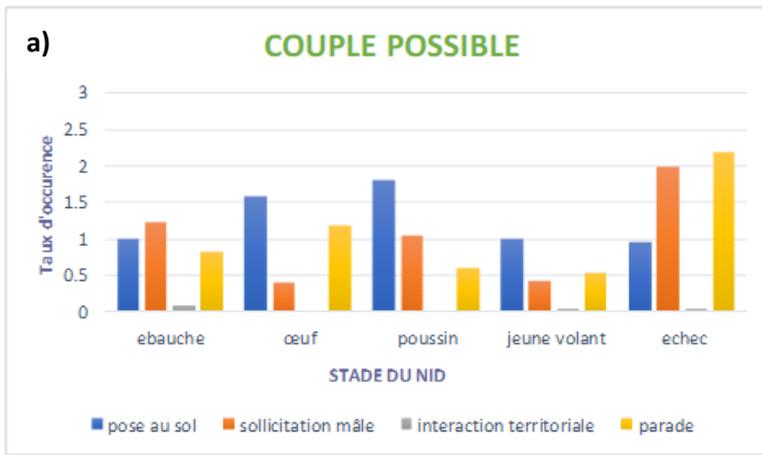


Figure 12 : représentation pour chaque catégorie de couple de la somme des comportements en fonction du temps d'observation par stade de nid

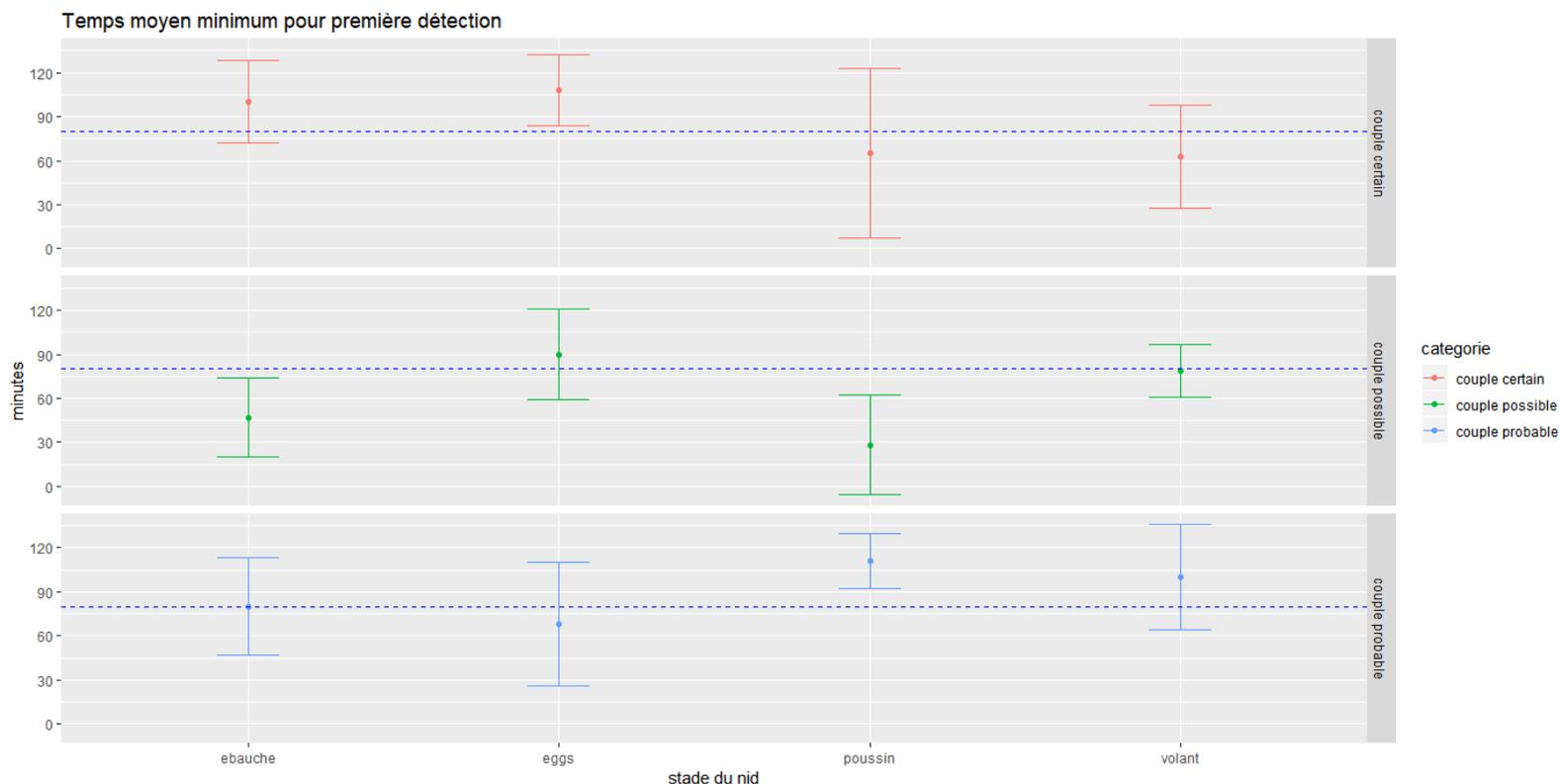


Figure 13 : Temps minimum d'observation pour détecter un comportement en fonction de la catégorie de couple et du stade de nidification, les lignes bleues représentent 80 minutes durée utilisée lors des suivis à large échelle

IV. DISCUSSION et PERSPECTIVES

Le FEDER ECoPap constitue le premier programme de recherche-actions dédié spécifiquement à l'étude du Busard de Maillard en vue de sa conservation. Dans le cadre de cette étude spécifique à la biologie de reproduction de l'espèce, le jeu de données se base sur un total de 83 nids inventoriés depuis 2013 ainsi que sur un cumul de 620 heures effectives d'observations protocolaires réalisées de 2016 à 2019.

Nous avons montré que la période de reproduction du Busard de Maillard s'étale sur presque toute l'année (*figure 14*). Toutefois, les analyses effectuées sur la phénologie de reproduction suggèrent deux périodes de pontes (janvier/février et avril/mai). Ces résultats ne sont que partiellement en accord avec les études précédentes. Jusqu'à présent un seul pic de ponte avait été observé en mars/avril, la période de ponte ne débutait au plus tôt qu'en janvier avec une proportion de ponte bien inférieure ce mois-ci (*cf. figure 6, page 8*). L'observation d'une période de ponte étalée chez cette espèce est cohérente avec ce que l'on peut observer chez d'autres espèces de busards de l'hémisphère Sud mais cela contraste fortement avec ce qui a été décrit chez les espèces de busards de l'hémisphère Nord (*tableau 9*). Les différences dans les phénologies de reproduction peuvent ainsi être liées à plusieurs facteurs, comme le climat du site de nidification, le caractère sédentaire ou migrateur de l'espèce, et le caractère plus ou moins spécialiste de l'espèce pour la ressource alimentaire. Ainsi le mode de vie sédentaire et qui plus est insulaire expliquerait également la durée d'émancipation⁸ des jeunes relativement longue, qui varient de 3 mois à 6 mois pour les femelles⁹ et jusqu'à 10 mois lors de certaine observation. De plus, nous n'avons pas observé d'effet de la date de ponte sur le succès reproducteur, suggérant que les conditions à La Réunion sont moins contraignantes sur l'ensemble de la période de reproduction, à contrario des zones tempérées. Afin de mieux appréhender les comportements de reproduction chez l'espèce, ces comportements observés ont été mis en lien avec le contenu des nids connus. Nos résultats ont permis de mettre en évidence qu'à l'exception du « transport de matériel » et des « interaction territoriale », tous les comportements reproducteurs sont identifiés à tous les stades de nidification : ébauche, œufs, poussins, volants, voir même lorsque le nid est en échec. De plus, les modèles de GAMMs ont seulement permis de mettre en évidence un effet de la date depuis la ponte pour le comportement de « parade », ce qui suggère que les autres comportements ne semblent pas significativement corrélés à des stades de nidification précis.

⁸ stade à partir duquel le jeune, est capable de subvenir seul à ses besoins et devient alors totalement indépendant

⁹ informations issues de l'étude préliminaire des domaines vitaux de jeunes individus équipés par GPS

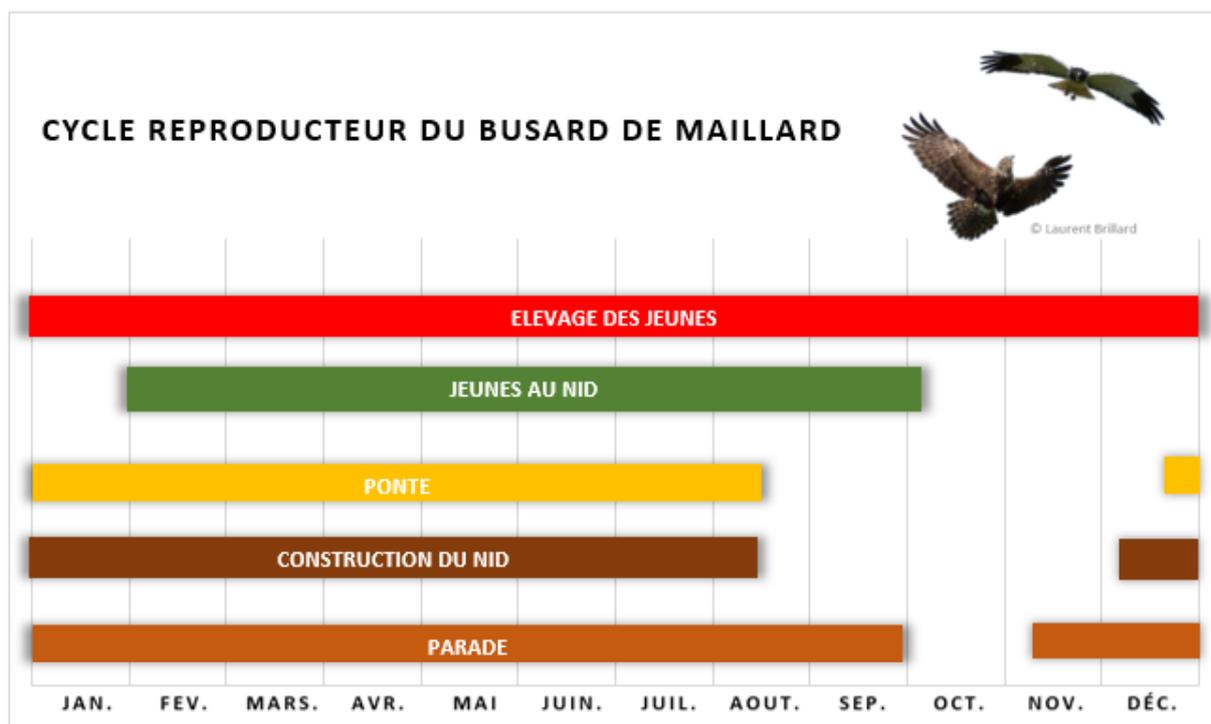


Figure 14 : Représentation du cycle reproducteur du Busard de Maillard au cours d'une année

Espèces et répartition	phénologie de la période ponte	Auteurs
Busard de maure, (<i>Circus maurus</i>) Afrique du Sud	6-8 mois (mi-mai à mi-décembre) (juin à novembre)	Curtis et al. 2004 Garcia 2016
Busard bariolé (<i>Circus cinerus</i>), Amérique du Sud	4mois (octobre a janvier, partie sud de sa distribution)	Hoyo et al. 1994 Globalraptor.org
Busard grenouillard (<i>Circus ranivorus</i>), Afrique	> 7 mois (période plus intense en décembre à juillet, nord distribution et juin à novembre, sud distribution)	Simmons 2000 Globalraptor.org
Busard de Buffon (<i>Circus buffoni</i>), Amérique du Sud	5 mois (septembre à janvier, argentine)	Globalraptor.org
Busard tacheté (<i>Circus assimilis</i>), Australie	5 mois (juin à octobre) 2 à 7 mois (mars-septembre, nord Australie + les îles et septembre à octobre, sud Australie)	Baker-Gabb 1978
Busard des Roseaux (<i>Circus aeruginosus</i>), Europe	3 mois pour les populations migratrices 3 mois et demi pour les populations sédentaires (mars à juin)	Simmons 2000 Blanc 2012

Tableau 9 : phénologie de reproduction chez certaines espèces de *Circus* de l'hémisphère Sud

De plus, il est difficile de savoir si les sollicitations de jeunes à des périodes non cohérentes (ébauche, échec, voir poussins en bas âge) sont liées à des nids manqués lors du suivi spécifique, à des juvéniles volants qui se seraient éloigner de leur zone de naissance, ou bien à des individus immatures (6-12mois), issus de la nichée précédente sur le même site, sollicitant encore leurs parents. De ce fait, la distinction des catégories de couple possible, probable ou certain (cf. *tableau 2, page 9*) en fonction des comportements identifiés semble en partie biaisée. Une nouvelle proposition de catégorie est réalisée en utilisant non plus la reproduction certaine mais la formation du couple certain (*tableau 10*). On note également un fort effet de l'année pour certains comportements, suggérant des variations interannuelles parfois importantes de la période de ponte. Ces variations pourraient s'expliquer par le passage de cyclones dont le nombre et l'intensité peuvent varier fortement entre les années, au cours des mois de Décembre à Février et qui correspondent pour cette espèce au début du cycle de la reproduction (*figure 14*). Pour appuyer ce propos, on pourra remarquer que l'année 2018 présente des différences fortes avec les autres années de suivi, alors que justement 2018 a été marquée par des cyclones importants. Des années supplémentaires de suivi seront nécessaires pour confirmer ou infirmer cet effet. Les analyses de la phénologie de reproduction et de la détection des comportements reproducteurs ont aussi permis de mettre en évidence que les recensements doivent prendre en compte plusieurs paramètres à minima (*tableau 11*). Aussi afin d'améliorer la précision des données, il faudrait directement prendre en compte la présence de nids connus lors des sessions d'observation. Cependant ne disposant que de très peu d'oiseaux marqués et ayant une forte densité de nids sur certaines zones, il a été assez difficile de pouvoir relier les comportements de couples reproducteurs aux nids connus. Ainsi, afin d'être en mesure d'assurer un suivi plus précis et exhaustif de la population sur la zone d'étude de Bras-Panon, la mise en place d'un marquage sur un nombre important de couples reproducteurs est fortement recommandée pour améliorer la qualité des données collectées.

Une fois le suivi des couples et la localisation des nids effectués, cette étude a permis de traiter un jeu de données, le plus important jamais constitué à ce jour, portant sur les paramètres reproducteurs. Un élément alarmant ressort de cette étude, le succès d'éclosion très faible de 0.43, indiquant que plus d'un œuf pondu sur deux n'écloît pas. Chez d'autres espèces du genre *Circus*, le taux de non-éclosion observé varie fortement ; pour exemple le Busard Saint-Martin de 6 à 38% ([Sentenac 2015](#)), Busard des Roseaux 40% ([Blanc 2012](#)), Busard cendré 16% ([Sentenac 2015](#)). A cela s'ajoute une productivité relativement faible chez le Busard de Maillard de 0.67 ± 0.83 jeune par couple qui plus est en constante diminution depuis 1978 1,4 (n=5) et 1,2 en 2000 (n=30) ([Clouet 1978](#), [Gonin 2001](#)).

Type de comportement	Définition	Interprétation
Sollicitation juvénile	Sollicitation d'un adulte par un jeune.	Couple certain avec reproduction certaine
Passage de proie Transport de proie Interaction/vol de couple Transport de matériel Copulation Sollicitation mâle	Echange de proie entre un adulte et un jeune ou entre un mâle et une femelle Déplacement d'un mâle ou d'une femelle avec une proie. Vol d'un mâle et d'une femelle avec interaction (simulation de passage de proie, prise de serres) Mâle ou femelle transportant des matériaux pour la construction du nid. Copulation entre un mâle et une femelle. Cris stridents répétés par une femelle.	Couple certain (formation du couple certain mais pas de reproduction certaine)
Pose sol Défense de territoire Parade (1) et (2) Cri alarme	Adulte gagnant, occupant ou quittant le site d'un nid potentiel. Piqué d'un mâle ou d'une femelle sur un intrus puis accompagnement hors du territoire. Parade d'un individu seul ou d'un mâle et une femelle Cri d'alarme émis par un mâle ou une femelle à l'encontre d'un intrus.	Couple probable (formation du couple en cours)

Tableau 10 : réajustement du protocole de suivi des comportements reproducteurs observables chez le Busard de Maillard et probabilité de la formation du couple reproducteur

Comportements	Période de détection favorable (en minutes depuis le lever du soleil)	Conditions météorologiques optimales
Parade	0 à 300 minutes	0 à 60% de couverture nuageuse Présence de vent faible à moyen
Sollicitation mâle	0 à 250 minutes	Non significatif
Sollicitation jeune	Non significatif	Pas de pluie
Pose au sol	0 à 300 minutes	Non significatif
Vol sans comportement	100 à 300 minutes	Présence de vent faible à moyen

Tableau 11 : Comportement reproducteur du Busard de Maillard ayant effet significatif de l'horaire et/ou des conditions climatiques lors des points d'observations focales. Résultats provenant des analyses des modèles de GAMM.

Chez d'autres espèces de busard de taille comparable, on note une productivité bien supérieure : Busard de maure 1.66 ± 1.30 (Garcia 2016), Busard des Roseaux 1.34 ± 1.44 (Blanc 2012). Parallèlement la survie des poussins jusqu'à l'envol chez le Busard de Maillard est estimée à 0,77 ce qui est similaire à d'autres espèces de busard et suggère donc que le faible taux de productivité qui affecte la fitness des couples reproducteurs provient principalement d'un taux d'éclosion très faible qui pourrait être lié à plusieurs facteurs.

Le Busard de Maillard, situé au sommet de la chaîne trophique, consomme en grande partie des rats (>50%) (Clouet 1978). Ces derniers, sont ciblés par des campagnes de traitement rodenticide à large échelle sur toute l'île. L'étude récente de Coeurdassier *et al.* (2019) a confirmé la présence généralisée de rodenticides dans l'organisme d'oiseaux amenés en centre de soins (93% des 58 individus testés). Les derniers résultats, encore non publiés, suggèrent qu'une grande partie des individus en nature (adulte et poussin) sont multi-exposés aux rodenticides (64% des individus). Si la survie des busards de Maillard peut être fortement diminuée via une bioaccumulation des molécules rodenticides utilisées ou via une intoxication aiguë¹⁰, il est également possible que ces rodenticides induisent des effets subléthaux, soit directement, soit indirectement au travers d'un affaiblissement des individus (Sentenac 2015 in Fox *et al.* 1978, Fry 1995). Salim *et al.* (2014) ont ainsi montré que des Effraies des clochers *Tyto alba* avaient un succès reproducteur plus faible après avoir été exposées à des molécules de rodenticides. Une deuxième hypothèse, possiblement concomitante à l'utilisation des rodenticides, pourrait être liée à la perte de diversité génétique via le processus de dérive génétique (Reed 2003). Pour appuyer cette hypothèse, les premiers résultats issus d'une étude pilote menée avec l'université de Sheffield en Angleterre, montre que les 13 échantillons de Busard de Maillard testés présente un déficit de diversité alléliques, laissant supposer qu'un goulot d'étranglement semble être apparu dans la population. Il est cependant important de nuancer les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, au vu de la localisation des suivis restreints sur environ 26 000 ha localisés à l'Est de l'île qui totalise 2512 km². Nous ne pouvons donc pas affirmer que ces résultats soient généralisables à l'échelle de La Réunion du fait que l'île présente une mosaïque d'habitats liés à des conditions météorologiques très contrastées (Est – Ouest et entre les hauts et les bas de l'île), pouvant possiblement affecter la phénologie de la végétation, des ressources trophiques et *in fine* la période de reproduction. Garcia (2017) a montré que les variables environnementales des différentes régions occupées par le Busard maure avaient un effet significatif sur les paramètres reproducteurs de l'espèce.

¹⁰ consommation de rats résistants aux molécules employées et donc a priori présentant des concentrations en rodenticides plus élevées

Nous avons également montré que 96% des nids trouvés en ébauche n'ont pas produit d'œuf, ce qui pourrait provenir d'une sensibilité de l'espèce au dérangement humain à une période où de nombreuses espèces de rapaces sont connues pour être affectées par les perturbations d'origine anthropique. Cependant des couples suivis pendant plusieurs mois, sans que les nids soient visités, n'ont jamais engagé une nidification par la suite. Il est donc possible que ces nids restant au stade d'ébauche soit le résultat d'une incapacité des adultes à produire des œufs, indépendamment du dérangement inévitablement associé à une visite au nid. Bien que ce travail ait permis de préciser sur une taille d'échantillons respectable, collectée sur plusieurs années, certains éléments clés de la biologie de reproduction de cette espèce, il est essentiel de poursuivre les efforts de collecte de données relatives à sa biologie de reproduction. Compte tenu des enjeux de conservation, il apparaît nécessaire d'être à même de pouvoir estimer la fluctuation des paramètres reproducteurs de l'espèce et de compléter les connaissances sur des éléments encore méconnus chez l'espèce : fidélité des couples, possibilité d'effectuer des pontes de remplacement, survie juvénile et adulte et en parallèle sur d'autres sites de l'île. La mise en œuvre d'un marquage alaire sur un nombre suffisant de couples dans l'avenir est primordiale afin de mieux appréhender ces mécanismes. De plus, il sera intéressant d'approfondir les analyses de distribution spatiale des nids afin d'évaluer comment la modification, la perte de certains habitats, et la proximité de certaines zones urbaines ou agricoles, peuvent affecter les paramètres reproducteurs. Au vu des résultats, il devient primordial d'accentuer les actions de conservations en lien avec les pratiques de dératisation pour diminuer la contamination des individus avec notamment la recherche de méthodes alternatives (biologiques et mécaniques) ou encore la mise en place d'une limitation (liée aux périodes sensibles de post éclosion) voire l'interdiction de l'usage des raticides dans les zones où des enjeux de conservation de la biodiversité ont été identifiés. En parallèle il est important d'évaluer si l'exposition aux rodenticides impacte significativement les paramètres reproducteurs à travers des études spécifiques. La poursuite de l'étude préliminaire engagée sur la génétique des populations est également primordiale pour la compréhension des facteurs qui peuvent jouer sur la viabilité des populations. Enfin, pour la conservation de l'espèce, il est nécessaire que les zones de fortes densités de nids qui seront probablement réutilisées les années suivantes soient identifiées et que des actions de protection des sites soient engagées, tout en y intégrant des mesures de gestion dédiés pour éviter le dérangement dans les périodes sensibles (reproduction et de l'élevage des jeunes) ou tout simplement éviter leurs destructions. Il est donc essentiel de continuer les suivis à fine et large échelle en réadaptant le protocole à l'aide des éléments apportés lors de cette étude afin de gagner en efficacité et précision.

BIBLIOGRAPHIE:

Altmann, J. 1974 - Observational study of behavior: sampling methods. *Behaviour* 49: 227-267

Baker, G. & David, J. 1978 - Aspects of the biology of the Australasian harrier (*Circus aeruginosus approximans* Peale 1848) A thesis presented for the degree of Master of Science by thesis only in Zoology at Massey University.

Beissinger, S.R. & Westphal, M.I. 1998 - On the Use of Demographic Models of Population Viability in Endangered Species Management. *The Journal of Wildlife Management* 62:821-841

Blanc, J.F. 2012 - Le Busard des roseaux, une espèce adaptable ou spécialiste menacée ? Analyse des effets de l'habitat sur la reproduction, la dispersion et la survie. Mémoire pour l'obtention du diplôme de l'École Pratique des Hautes Études. 100p

Bretagnolle, V., Thiollay, J.M. & C. Attié. 2000a - Status of Reunion Marsh Harrier *Circus maillardi* on Reunion island. Chancellor, R.D. & B.U. Meyburg. *Raptors at risk*. World Working Group on Birds of Prey and Owls, Berlin, and Hancock House, Blaine, WA U.S.A. p. 669-676

Bretagnolle, V., Ghestemme, T., Thiollay, J.M. & C. Attié. 2000b - Distribution, population size and notes on the Reunion Marsh Harrier, *Circus maillardi*. *The raptor Research Foundation* 34 : 8-17

Brown, J.L., Steenhof, K., Michael, N., Kochert, M.N. & Bond, L. 2013 - Estimating Raptor Nesting Success: Old and New Approaches. *J Wildl Manage* 77: 1067–1074

Cam, E., Monnat, J.Y. & Hines, J. E. 2003 - Long-term fitness consequences of early conditions in the kittiwake. *Journal of Animal Ecology* 72(3)

Cheke, A. 1987 - The ecology and distribution of native land birds of Reunion. Reunion Harrier (*Circus maillardi*) Verreaux. In Diamond A.W. *Edition Studies of Mascarene island birds*. Cambridge University Press, p. 311-314.

Clouet, M. 1978 - Le Busard de Maillard (*Circus aeruginus maillardi*) de l'île de La Réunion. *L'Oiseau et la Revue Française d'Ornithologie* 48 : 95-106

Clouet, M. 2015 - The reunion harrier *circus maillardi* of the island of reunion, 40 years later. *Alauda* 83 : 161-164

Colombe, V. 2013 - Écologie du Busard de Maillard – Zone d'étude des hauts de la ville de Bras- Panon. Rapport de stage Master 2 Biodiversité et ÉcoSystèmes Tropicaux

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

Del Hoyo J., Elliott A. & Sargatal J. 1994 - Handbook of the birds of the world, Volume 2. New World Vultures to Guineafowl, Lynx, Barcelona, p. 638.

Diamond, J.M. 1984. – Normal extinctions of isolated populations. *Extinctions*. Chicago University Press, Chicago.

DIREN & ONCFS 2005. - Stratégie Réunionnaise pour la Biodiversité. p.167

Dirzo, R., Peter, H. & Raven, P.H. 2003 - Global state of biodiversity and loss. Annual Review of Environment and Resources 28 : 137-167

Dubois, S. 1674. - Les voyages faits par le sieur D.B. aux isles Dauphine ou Madagascar & Bourbon, ou Mascareignes. Les années 1669.70.71 & 72. Paris. 234 p.

Fond International pour les rapaces. 1982 - Estimation des effectifs nicheurs diurnes et non rupestres en France. 178 p.

Garcia, H. M-S., Arroyo, B., Mougeot, F., Amar, A. & Simmons, RE. 2016 - Does timing of breeding matter less where the grass is greener? Seasonal declines in breeding performance differ between regions in an endangered endemic raptor. Nature Conservation 15:23–46.

Ghestemme, T., Portier, E. & M. Le Corre 1998 - Recensement de la population de Papangues de la Réunion, *Circus maillardi maillardi*, densité et distribution des couples reproducteurs. SEOR et Annexes

Ghestemme, T. 2000 - Contribution à l'étude de la distribution et la reproduction des « Papangues » SEOR. Taille-Vent 5-6 : 4-10.

Ghestemme, T. 2005 - Connaissance et étude du Papangue, *Circus maillardi*. Rapport SEOR.

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.

Grondin, V. & Philippe, J.S. 2011 - Plan de conservation du Busard de Maillard (*Circus maillardi*). SEOR et BIOTOPE pour la DEAL, la Région Réunion, Aérowatt et la Ville de l'Etang-Salé, 81p. (et atlas cartographique)

Guillot, L. 1984 - Le Busard de Maillard *Circus maillardi* (Verreaux) ou Papangue. Revue scientifique du Bourbonnais et du centre de la France. Imprimerie réunies, Moulins. p: 81-91

Lagabriele, E. 2007 - Biodiversity conservation planning and territorial modelling in Réunion Island. Thèse en Sciences de l'Homme et Société / Géographie. 174p

Lagabriele, E., Rouget, M., Payet, K., Wistebaar, N., Durieux, L., Baret, S., Lombard, A. & D. Strasberg. 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

Le Corre, M. & R. Safford. 2001 - Reunion and Iles Eparses. In Fishpool (eds), Important Bird Areas in Africa and Related Islands. BirdLife International Conservation Series.

Macdonald I.A.W., Thebaud C., Strahm W.A. & Strasberg D. 1991 - Effects of alien plant invasions on native vegetation remnants on La Reunion (Mascarene Islands, Indian Ocean). Environ. Conserv. 18: 51–61.

Maillard, L. 1863 - Notes sur l'île de la Réunion (Bourbon)- 2ieme édition. PARIS, Ed. Palais royal, galerie d'orléans 13. Introduction, note chronologique p. 7-36.

Maillot, D. & Baret S. 2017 - Identification d'une nouvelle proie du Busard de Maillard (*Circus maillardi*) : observation d'une capture de poisson au niveau du site de Grand-Étang sur l'île de La Réunion (Accipitriformes : Accipitridae) Cahiers scientifiques de l'océan Indien occidental 8: 1-4.

Mittermeier, R.A., da Fonseca, G.A.B., Hoffman, M., Pilgrim, J., Brooks, T., Gill, P.R., Mittermeier, C.G. & Lamoreux, J. 2005 - Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered terrestrial ecoregions. Conservation International

Mittermeier, R.A., Will R. Turner, R.W, Larsen, F.W, Brooks, M.T. & Gascon, C. 2011 - Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots p3-22

Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A.B. & Kent J. 2000 - Biodiversity hotspots conservation priorities. Nature 403: 853–858

Němečková, I., Vojtěch, M. & Drozd, P. 2008 - Timing of breeding, habitat preference and reproductive success of marsh harriers (*Circus aeruginosus*) Biologia 63/2: 261—265, Section Zoology)

Jakubek, G., Le Corre, M., Gerdil, T., Barré, S. & Besnard, N. 1997 - Distribution du papangue (*Circus maillardi*) à la Réunion: résultats préliminaires et proposition méthodologique. Le Taille-Vent: 3-6

Oatley G., Simmons R.E. & Fuchs J. 2015 – A molecular phylogeny of the harriers (Circus, Accipitridae) indicate the role of long distance dispersal and migration in diversification. Molecular Phylogenetics and Evolution, 85 : 150-160.

Probst, J.M. 1996 - La Papangue ou Busard de Maillard, *Circus maillardi*. Bull. Phaethon, 4 : 79-80

Probst, J.M. 1990 - Le Busard de Maillard ou « papangue » *Circus maillardi* de l'île de la Reunion. rapport technique naturaliste pour le fond d'intervention pour les rapaces

Randriamanga, I., 2000 – Contribution à l'étude de la biologie de la reproduction et écologie de Busard de Madagascar *Circus macroscelus* dans le Tampoketsa d'Ankazobe. Mémoire de diplôme d'études approfondies de sciences biologiques appliquées, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar

Reed, D.H., & Frankham, R. 2003 - Correlation between Fitness and Genetic Diversity. Conservation biology 17: 230-237

Rene De Roland, L.A., Rabearivony, J., Randriamanga I. & Thorstrom R., 2004 – Nesting Biology and Diet of the Madagascar Harrier (*Circus macroscelus*) in Ambohitantely Special Reserve, Madagascar. Journal of Raptor Research, 38 : 256-262.

Salim, H., Noor, H.N., NH Hamid, N.H., Dzolkhifli, O., Kasim, A. 2015 - The Effects of Rodenticide Residues Deposited in Eggs of *Tyto alba* to Eggshell Thickness. Sains Malaysiana 44: 559–564

Sentenac, H. 2015 - Causes possibles de non-eclosion chez le Busard Saint-Martin (*Circus cyaneus*), These de Doctorat - Vetagro sup campus vétérinaire de LYON. 198p

Simmons, R.E. 2000 – Harriers of the World: Their Behaviour and Ecology. Oxford University Press, 384 p.

Simmons, R.E. 2010 - The Nest, Eggs, and Diet of the Papuan Harrier from Eastern New Guinea," *Journal of Raptor Research* 44(1)

Steenhof K. & Newton I. 2007 - Assessing raptor nest success and productivity. In: Bird DM, Bildstein KL, editors. *Raptor Management and Research Techniques*. Hancock House; Blaine, WA, USA: 181–192.

Strasberg, D., Rouget, M., Richardson, D.M., Baret, S., Dupont, J. & Cowling, R.M.. 2005 - An assessment of habitat diversity and transformation on La Réunion Island (Mascarene Islands, Indian Ocean) as a basis for identifying broad-scale conservation priorities. *Biodiversity and Conservation* 14: 3015-3032

UICN France, MNHN, SEOR, ARDA, Insectarium de La Réunion, GLOBICE & Kélonia 2010 - La Liste rouge des espèces menacées en France - Premiers chapitres consacrés à la faune de La Réunion. Dossier électronique

Vilà, M., Espinar, J.L. & Hejda, M. 2011 - Ecological impacts of invasive alien plants: a meta analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters* 14, 702–708.

Witkowski, J. 1989 - Breeding biology and ecology of the marsh harrier *Circus aeruginosus* in the Barycz valley, Poland *Acta orn.* 25: 223-320.

ANNEXES

Annexe 1 : Présentation générale des volets du programme FEDER

Annexe 2 : Cartographie des milieux de l'île de La Réunion

Annexe 3 : Cartographie de la localisation des points d'observation du protocole de suivi de la phénologie de reproduction de 2016 à 2019

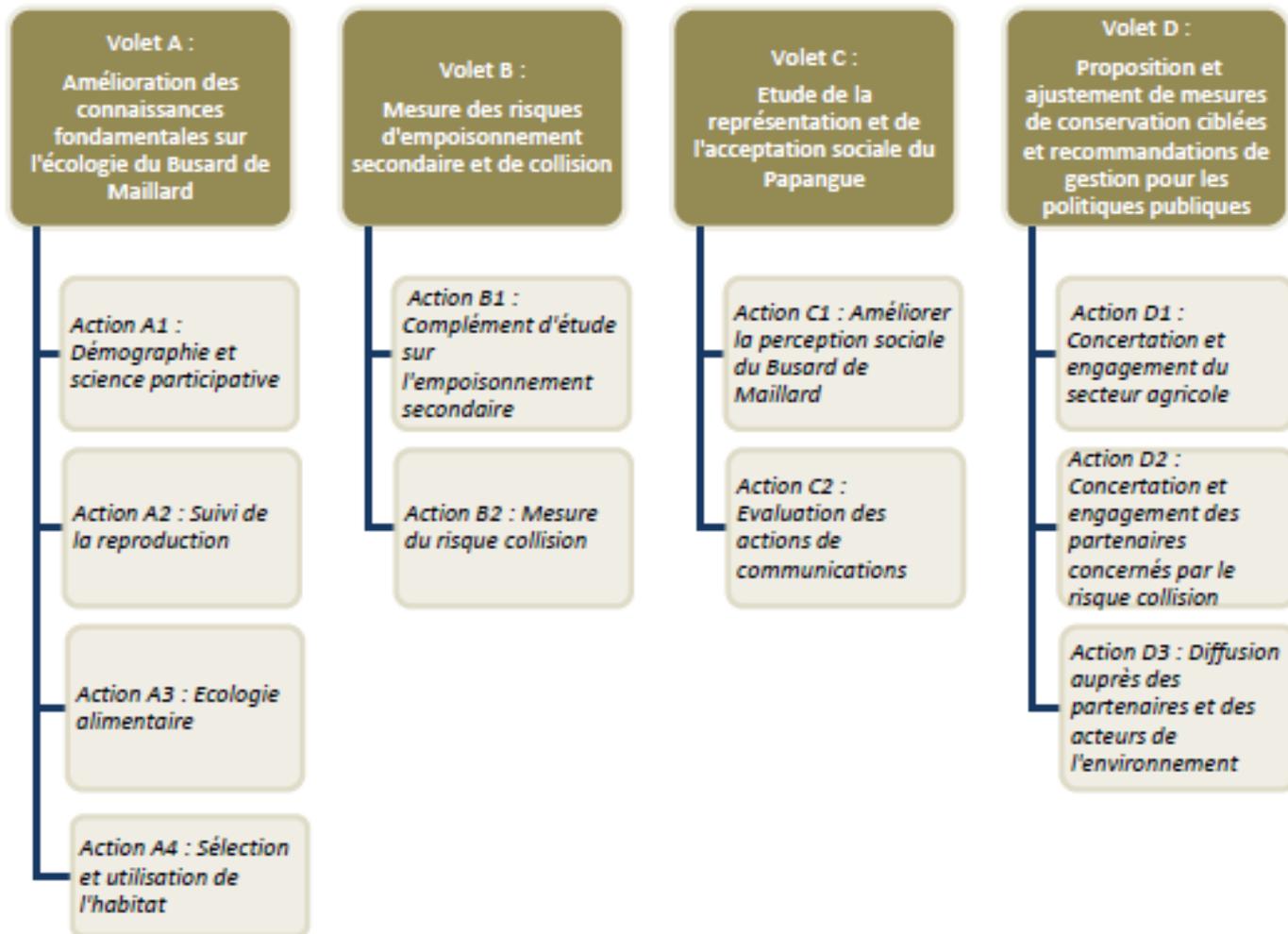
Annexe 4 : Dimension et dimorphisme sexuel inversé des 16 espèces de Busard, en rouge informations sur le Busard des roseaux issue de Simmons 2000

Annexe 5 : Suite des résultats des modèles de GAMM pour les comportements de transport de proie et de sollicitation de mâle

Annexe 1 : Présentation générale des volets du programme FEDER

Le FEDER dénommé « Écologie et Conservation du Papangue » (ECoPap) cofinancé par l'Union Européenne, la DEAL Réunion, la région Réunion, EDF et Téréos Sucre OI ayant pour objectif premier d'améliorer les connaissances fondamentales sur l'écologie du Busard de Maillard en vue de mettre en place des mesures de conservation efficaces et adaptées à l'espèce. Il est composé de 4 volets.

1. Un projet à 4 volets



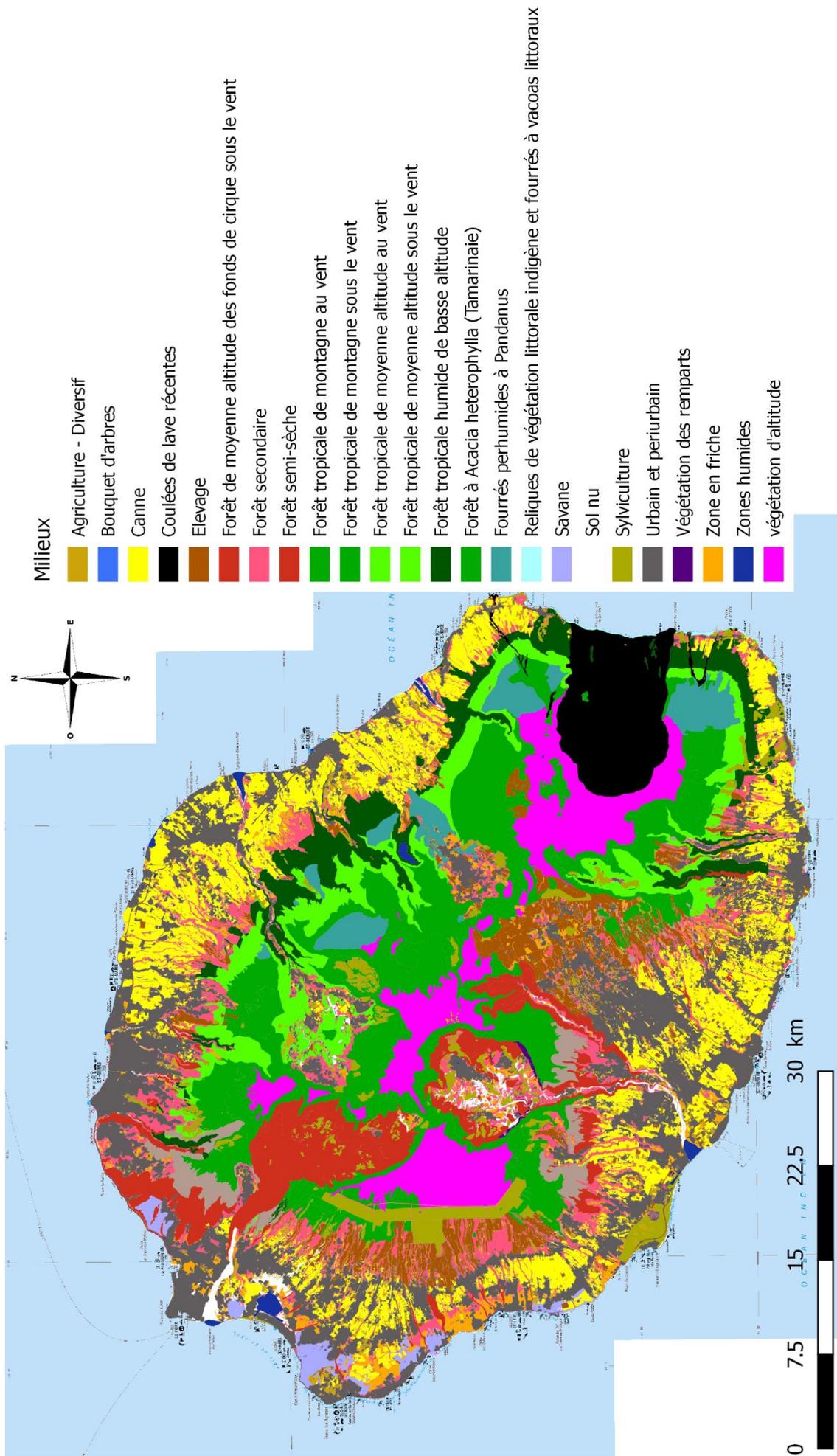
Société d'Études
Ornithologiques
de la Réunion

ADRESSE : 13, ruelle des Orchidées
Saint-André - 97440
TÉL/ FAX : 0262 20 46 65 - 0262 98 90 48

www.seor.fr

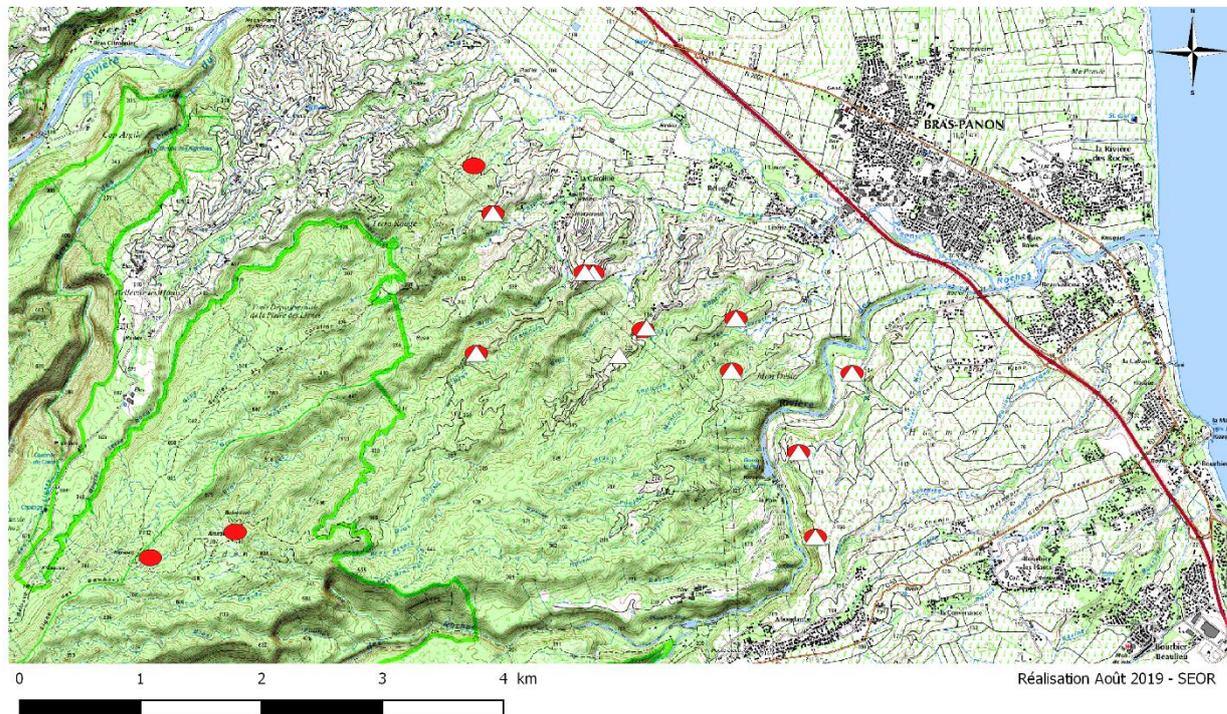
Annexe 2 : Cartographie des milieux de l'île de La Réunion

CARTOGRAPHIE DES TYPES DE MILIEUX SUR L'ILE DE LA REUNION



Annexe 3 : Cartographie de la localisation des points d'observation du protocole de suivi de la phénologie de reproduction de 2016 à 2019

LOCALISATION DES POSTES D'OBSERVATION SUR LA ZONE D'ÉTUDE DE BRAS-PANON - 2016 À 2019



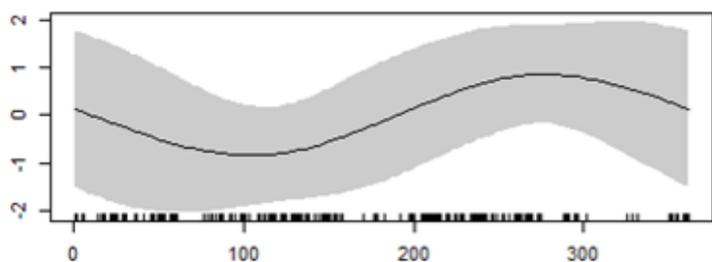
Annexe 4 : Dimension et dimorphisme sexuel inversé des 16 espèces de *Busard*, en rouge informations sur le Busard des roseaux données issue de Simmons 2000

Table 2.2 Body dimensions and Reversed Size Dimorphism indices of the world's 16 species of harriers. Mean values after Nieboer (1973), and mass data from Nieboer, and Brown and Amadon (1968) unless stated otherwise. Measurements given in [] are those derived from egg volume – female mass equations found in Chapter 7. The largest values for each variable are given in **bold**.

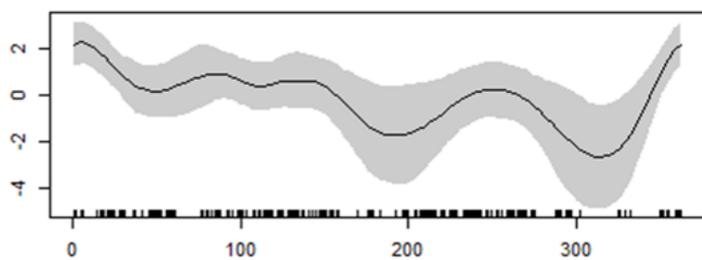
Species	Mass		RSD	Wing chord		Tarsus		Tail		Source
	♂	♀		♂	♀	♂	♀	♂	♀	
Pallid	310	440	35	340	371	66.5	71.8	208	236	
Montagu's	265 ¹	345	27 (16)	365	372	58.1	60.5	218	225	
Hen (west) ²	346	527	41	338	376	69.3	74.5	213	243	a
Hen (east)	340	500	40	349	386	69.4	75.3	220	250	
Northern	370	546	38	346	390	73.6	81.6	213	241	b
Cinereous	338	496	38	329	358	66.1	71.2	210	233	c
Pied	290	390 [429]	29	353	369	74.2	79.1	202	217	
Black	[364] ³	[573]	—	344	371	71.0	73.0	231	254	
Spotted	465	671	36	393	440	89.7	98.2	245	274	d
Longwinged ⁴	397	612	43	395	415	77.1	82.7	235	254	e
Longwinged	"	"		413	445	77.9	85.6	242	266	
African Marsh	430	570	28	367	378	77.6	81.6	220	235	f
European Marsh	530	720	30	393	413	84.7	88.4	224	239	g
Eastern Marsh	600	780	26	404	422	86.7	89.5	228	242	
Australian Marsh	647	890	32	406	424	89.9	97.0	227	240	h
Papuan	—	—	—	380	409	83.4	92.0	222	232	
Reunion	—	[573]	—	350	374	80.0	83.3	216	234	
Madagascar	600	850	34	415	438	89.1	93.1	235	247	i

Annexe 5 : Suite des résultats des modèles de GAMM

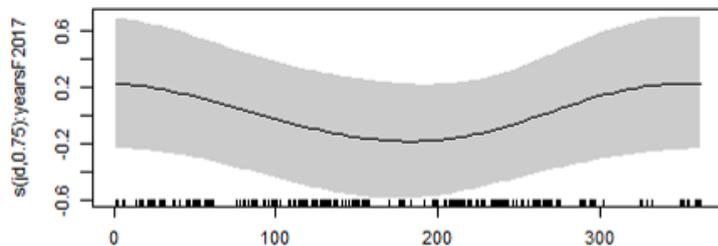
e) Transports de proie



2016



2018



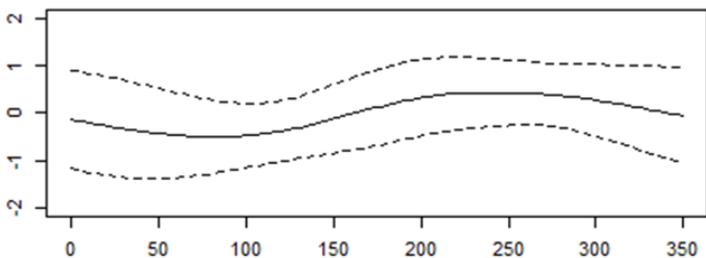
2017

Modèle avec le meilleur AIC :

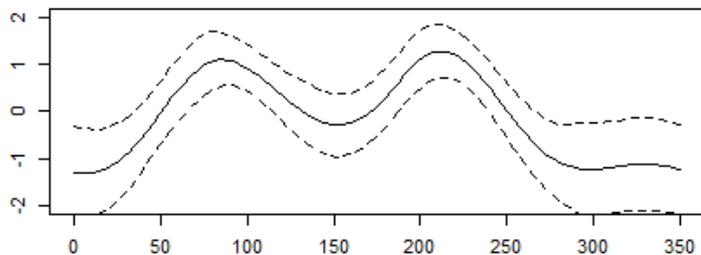
transport de proie ~ jour julien avec effet aléatoire en année + minute + année + PO + offset durée focale + nuage + pluie + vent
Déviance expliquée = 26.8%

Figure 11e) : résultat du modèle GAMM pour le comportement de **transport de proie**. On observe un effet significatif du jour julien pour l'année 2018 ($p < 0.001$) et du point d'observation ($p < 0.01$)

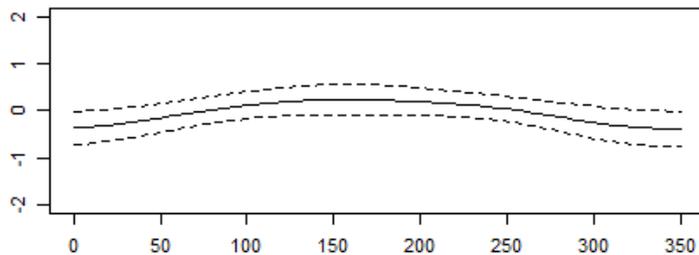
f) Sollicitation d'un mâle par une femelle



2016



2018



2017

Modèle avec le meilleur AIC :

sollicitation mâle ~ jour julien avec effet aléatoire en année + minute + année + PO + effet durée focale + nuage + pluie + vent
Déviance expliquée = 34.5%

Figure 11f) : Résultat du modèle GAMM pour le comportement de **sollicitation mâle**. On observe un effet significatif du jour julien pour l'année 2018 ($p < 0.0001$), point d'observation ($p < 0.01$) et pour l'horaire de la focale ($p < 0.05$)

Résumé

Cette étude spécifique à la biologie de reproduction du Busard de Maillard, *Circus maillardi*, unique rapace endémique en danger d'extinction de l'île de La Réunion, se base sur un total de 83 nids depuis 2013 ainsi que sur un cumul de 620 heures effectives d'observations réalisées de 2016 à 2019. Les deux objectifs principaux sont l'amélioration des connaissances sur la biologie de la reproduction de l'espèce et l'analyse de la méthode de recensement des couples reproducteurs. Ainsi, chez cette espèce semi-coloniale, la période de reproduction s'étale sur presque toute l'année avec une période de ponte qui s'observe durant 9 mois (déc. à août). Certains paramètres de reproduction sont relativement faibles : un succès d'éclosion de 0.43 ± 0.28 et une productivité de 0.67 ± 0.83 en constante diminution depuis 1978. Plusieurs facteurs pourraient en être la cause dont l'exposition des individus aux rodenticides et la dérive génétique dans cette petite population. Il devient donc essentiel de mettre en place des études spécifiques afin d'identifier les facteurs qui jouent sur ces paramètres, tout en proposant des actions de conservation en lien avec les périodes les plus sensibles lors de la reproduction. Enfin, nous proposons une adaptation du protocole de recensement des couples reproducteurs prenant en compte les paramètres qui influent sur la détection des comportements reproducteurs (durée, période, heure, conditions météorologiques).

Mots clés : *Circus maillardi*, conservation, paramètres reproducteurs, phénologie de la reproduction, méthodologie, couples reproducteurs

Abstract

This study, which is specific to the reproductive biology of the the Reunion Harrier, *Circus maillardi*, the only endemic raptor in danger of extinction in Reunion Island, is based on a total of 83 nests since 2013 as well as a total of 620 hours of observations from 2016 to 2019. The two main objectives are the improvement of knowledge about the reproductive biology of the species and the analysis of the census method of breeding pairs. Thus, in this semi-colonial species, the reproduction period is spread over most of the year with a laying period that is observed during 9 months (December to August). Some reproductive parameters are relatively low: an hatching success of 0.43 ± 0.28 and a productivity of 0.67 ± 0.83 which has been steadily decreasing since 1978. Several factors could be the cause, including the exposure of individuals to rodenticides and genetic drift in this small population. It therefore becomes essential to set up specific studies to identify the factors that play on these parameters, while proposing conservation actions related to the most sensitive periods during reproduction. Finally, we propose an adaptation of the census protocol of breeding pairs taking into account the parameters that influence the detection of reproductive behaviours (duration, period, time, weather conditions).

Key words: *Circus maillardi*, conservation, reproductive parameters, reproductive phenology, methodology, breeding pairs