

RAPPORT D'ÉTUDE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
- ANNÉE 2021-2022 -

L'efficacité du plan de lutte contre le rat noir (*Rattus rattus*) en mangrove pour la protection du Crabier blanc (*Ardeola idae*) à Mayotte

NATHAN CAZELLES

Master 2 Gestion de l'Environnement

Parcours Ingénierie Ecologique et Gestion de la Biodiversité (IEGB)

Stage du
26 février au
26 août 2022

Association GEPOMAY (Groupe
d'Études et de Protection des
Oiseaux de Mayotte).
4 impasse Tropina,
Miréreni, Mayotte.

Maitre de stage :
Steeve Mathieu
Tuteur pédagogique :
Olivier Duriez



MISSIONS
ET
CONTEXTE

Missions de stage

A) Lutte contre le Rat noir en mangrove et suivi de son efficacité

- Recherche et synthèse bibliographique
- Maintenance et retrait des pièges létaux A24 sur trois sites différents de reproduction du Crabier blanc
- Mise en place, retrait et maintenance des indicateurs de présence, d'activité et de densité du rat (cages pour la CMR ; chewcards¹ ; caméra trap²)
- Capture et marquage (bague) des rats
- Récupération des données de photocomptage par drone des populations de Crabier blanc (nombre de couples et de juvéniles) sur des sites avec et sans lutte contre le rat
- Traitement et analyse des données :
 - Estimation d'indices d'activité ou de densité des rats à partir de : données CMR ; nombre de déclenchements des A24 ; proportion de chewcards consommées ; nombre d'individus observés sur des caméras trap
 - Comparaison des indices de densité avant, pendant et après la lutte sous R (fonctions : `closure.test()` ; `mark.wrapper()` package RMark ; `secr.fit()` package SECR ; `wilcox.test()` ; `chisq.test()` ; `fisher.test()` ; `aov()` et `games_howell_test()`)
 - Estimation du domaine vital du rat sur ces sites (via package SECR)
 - Estimation d'un indicateur du succès reproducteur du Crabier blanc sur des sites avec et sans lutte contre le rat et propositions d'amélioration du suivi
- Propositions d'optimisation de la lutte
- Rédaction des rapports et livrables
- Présentation de l'étude à d'autres organismes (*e.g.* Centre Universitaire de Mayotte)

B) Participation à la vie de l'association, soutien à l'équipe

- Participation ponctuelle à des actions en faveur du Crabier blanc sur ses sites d'alimentation
- Participation à des actions de communication et de sensibilisation sur la biodiversité et les activités de l'association
- Conseils sur des livrables

¹ Chewcard = carte avec appât attractif et support permettant un marquage des empreintes de dents

² Caméra trap = piège vidéo, appareil qui déclenche une prise de photo ou de vidéo (avec ou sans détection de mouvement)

Contexte de stage

L'intérêt de la thématique d'études pour l'employeur

Le fonctionnement de l'association Groupe d'Études et de Protection des Oiseaux de Mayotte (GEPOMAY) dépend en grande partie de subventions de partenaires financiers. Ces subventions sont d'autant plus faciles à obtenir que l'association démontre qu'elle est compétente. Actuellement, le GEPOMAY perçoit une subvention européenne de l'ordre de 700 000 euros sur un ensemble d'actions du programme LIFE BIODIV'OM. Parmi celles-ci, se trouve l'action C1 concernant la lutte contre le Rat noir (*Rattus rattus*) et l'étude de son impact sur le Crabier blanc (*Ardeola idae*) (CB), pour un budget prévisionnel de 113 558 euros (de 2019 à 2023). Dans ce cadre, l'association a des obligations de résultats dont le développement d'une méthode de lutte contre le rat adaptée aux mangroves et efficace pour la préservation du CB.

Dans le cadre de mon stage au sein de l'association, je réalise le suivi de cette lutte et propose des améliorations. La première méthode employée par le GEPOMAY pour évaluer l'efficacité des A24 est basée sur le nombre de déclenchements des pièges et la consommation de chewcards, des indicateurs peu coûteux mais dont la fiabilité peut être critiquée. Des résultats plus robustes, avec un indicateur de densité basé sur de la CMR, viennent compléter l'analyse. Une comparaison des résultats obtenus via les différents indicateurs devrait permettre de déterminer la fiabilité des indicateurs les moins coûteux : le nombre de déclenchements des A24 et les chewcards. Ceci permettra de faire des préconisations sur les indicateurs à utiliser à l'avenir pour des suivis efficaces (pertinents scientifiquement et peu coûteux). Enfin, les analyses devraient permettre de proposer des améliorations concernant la lutte contre le rat pour qu'elles soient adaptées au milieu et favoriser, comme demandé, la reproduction du CB. Un rapport détaillé sera rédigé et transmis à d'autres acteurs de la conservation, afin qu'ils puissent, s'ils le souhaitent, répliquer la méthode déployée ici en l'adaptant à leurs propres contraintes.

Les moyens mis à disposition pour le stage

L'équipe du GEPOMAY réalise un suivi du rat depuis 2019. Le stage actuel contribue depuis février 2022 et jusqu'à août 2022 à la réalisation des différentes tâches : environ 200 heures de terrains au côté du chargé d'étude CB (dépôt et relève de pièges A24, de cages et de chewcards) et 682 heures de bureau (bibliographie, traitement et analyse des données, rédaction de rapport). En plus d'une gratification de stage à 600 euros/mois, le GEPOMAY

m'a donné accès à un espace de travail (bureau), un véhicule de fonction ainsi qu'à des équipements de terrain, m'a fourni des ressources bibliographiques et des données archives sur le CB et le rat. Mon tuteur de stage m'accompagne sur les missions de terrain et reste disponible et joignable pour toute interrogation.

ETUDE

SOMMAIRE

Introduction	1
Le rat, un “fléau écologique” répandu	1
Lutte contre le rat	5
À Mayotte	5
Efficacité des pièges A24	7
Matériel et Méthode	9
Indice du succès reproducteur du Crabier blanc	9
Lutte contre le rat et suivi des populations	12
Déploiement des A24 et suivi des déclenchements	12
Suivi par Capture-Marquage-Recapture (CMR)	14
Suivi par la consommation de chewcards	17
Résultats	19
Suivi rat	19
Déclenchements A24	19
Populations de rats via CMR	21
Estimation du domaine vital	21
Estimation de la densité	21
Populations de rats via les chewcards	23
Suivi de l’indice du succès reproducteur du Crabier blanc	23
Discussion	25
Populations de rats	25
Densité de rats via CMR	25
Comparaison avec les autres méthodes de suivi	26
Chewcards (CC)	26
A24	27
Succès reproducteur du Crabier blanc	28
Optimisation de la lutte	30
Conclusion	32
Bibliographie et webographie	34
Annexes	39
Résumé et mots clés	44

Introduction

Le rat, un “fléau écologique” répandu

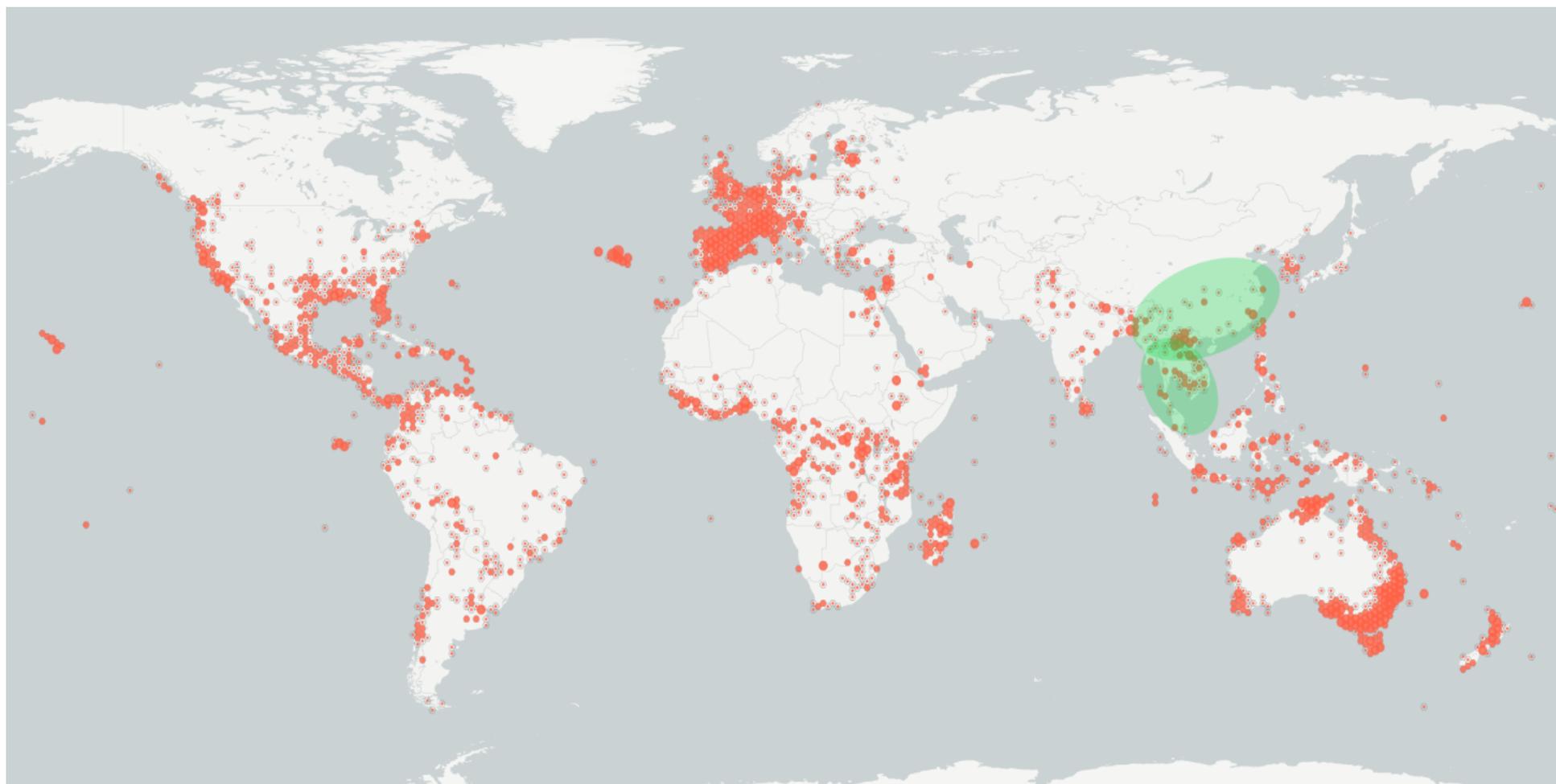
❖ Les rats dans le monde

L'une des principales menaces anthropiques à l'origine de la sixième extinction de masse des espèces est l'introduction d'espèces exotiques envahissantes (**EEE**³) (Ceballos *et al.*, 2015 ; Dueñas *et al.*, 2021). Parmi ces EEE, trois espèces de **rats** (*Rattus rattus*, *R. exulans* et *R. norvegicus*) ont notamment été introduits sur **82% des îles** et archipels du globe au cours des 3 000 dernières années (Atkinson, 1985). Ces espèces ont un **fort potentiel de colonisation** : elles ont une **stratégie reproductive “r”** qui se caractérise par une courte longévité (2 ans), une maturité sexuelle précoce (3 mois pour les femelles), et une forte production de petits (jusqu'à 6 portées par an de 4-5 petits) (Harper et Bunbury, 2015). De plus, leur **alimentation est omnivore opportuniste**, ce qui leur permet de se développer rapidement dans divers milieux en consommant des invertébrés, des crabes, des œufs, mais aussi des oiseaux et des déchets humains (Rocamora et Henriette, 2015 ; Dorst, 1963). À **forte densité**, les rats peuvent avoir de nombreux **effets délétères sur les écosystèmes**, notamment par la prédation ou la mise en compétition avec des espèces sensibles (Harris et Macdonald, 2007) ou encore par la transmission de pathogènes (Wyatt *et al.*, 2008). Ils **menaceraient ainsi plusieurs centaines d'espèces de vertébrés terrestres** et seraient déjà directement liés à l'extinction de 75 d'entre elles (52 espèces d'oiseaux, 21 de mammifères et 2 de reptiles) (Doherty *et al.*, 2016). Comme pour beaucoup d'EEE, l'impact du rat est accentué sur les îles du fait de sa prédation très importante sur des espèces souvent endémiques et non adaptées à ce type de prédation combiné à une absence ou à un faible nombre de prédateurs des rats en milieu insulaire (Dueñas *et al.*, 2021). Pour ces raisons, il y est considéré comme “un fléau écologique” (Rocamora et Said, 2005).

❖ Le Rat noir dans les mangroves mahoraises, une menace pour le Crabier blanc

Sur Mayotte, une seule espèce de rat a été identifiée : le Rat noir (*Rattus rattus*). Originaire d'Asie, celui-ci s'est déployé sur **l'ensemble des continents** (excepté l'Antarctique) et se retrouve sur de nombreuses îles (Figure 1) (Musser et Carleton, 2005). Le commerce arabe

³ Selon l'UICN une **EEE se définit** comme une espèce introduite par l'Homme en dehors de son aire de répartition naturelle et dont l'implantation et la propagation menacent les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes avec des conséquences écologiques et/ou économiques et/ou sanitaires négatives (CDR EEE, 2020).



■ Répartition indigène admise

■ Observations depuis 1619 jusqu'à 2022

Figure 1 : Carte de répartition du Rat noir (Rattus rattus) basé sur les observations depuis 1619 jusqu'à juin 2022. R. rattus serait originaire d'Asie de l'Est. Il est présent sur tous les continents sauf l'Antarctique, et sur de nombreuses îles dont Mayotte. (Naughton, 2016 ; ©OpenStreetMap contributors , ©OpenMapTiles, GBIF, consultable [ici](#))

florissant dans l'océan Indien au 5^e siècle aurait permis l'arrivée des Rats noirs à Madagascar puis sur Mayotte (Brouat et al., 2014 ; Russell et al., 2011).

Aujourd'hui, il est observé un peu partout sur l'île, y compris dans les mangroves mahoraises (GEPOMAY, 2020 a). Ces **écosystèmes riches en biodiversité** sont actuellement classés sur la **liste rouge des écosystèmes** par l'UICN France. Les 735 ha de mangroves de Mayotte présentent jusqu'à 43 espèces d'oiseaux nicheuses et migratrices (UICN France, 2017), dont le **Crabier blanc (*Ardeola idae*)** (CB). Ce dernier est une espèce d'ardéidé reconnue « **En danger d'extinction** » sur la **liste rouge mondiale des espèces menacées (EN, UICN)** et « En danger critique d'extinction » (CR, UICN) sur la liste rouge de France (UICN France, 2017). Le CB se reproduit exclusivement sur 4 îles : Aldabra, Europa, Madagascar et enfin **Mayotte** qui accueille, dans ses mangroves, **20 à 40 % des effectifs nicheurs mondiaux** de l'espèce (Vadier, 2020 ; Esnault, 2020) (Figure 2).

Dans le cadre du projet **LIFE BIODIV'OM**, le **GEPOMAY** a réalisé en 2018-2019 une **évaluation de l'impact des EEE** sur le CB, sur ses sites de reproduction (GEPOMAY 2020 c). L'impact du Rat noir était recherché. En effet, des populations de Rats noir des mangroves persiques sont reconnues comme le **principal facteur d'échec de reproduction chez d'autres espèces d'ardéidés** : la grande aigrette, *Ardea alba* (Neinavaz et al., 2013) et l'aigrette des récifs, *Egretta gularis* (Etezadifar et al., 2010). Les premiers résultats sur Mayotte n'ont pas montré de prédation du CB par le rat, mais des pièges photographiques attestent d'un déplacement des rats sur de fines branches de palétuviers **en direction de nids de CB**.

La **densité de rat n'est pas connue** sur **Grande Terre**⁴, mais elle est supposée dépendre de divers facteurs, dont la disponibilité des ressources (*i.e.* abris, aliments), ainsi que de la présence de compétiteurs et de prédateurs (Ng et al., 2016). En milieu tropical, l'absence d'hiver boréal limite la mortalité et favorise l'abondance de nourriture pendant une bonne partie de l'année, permettant ainsi une reproduction toute l'année (Harper et Bunbury, 2015). Ainsi, sur l'atoll d'Aldabra aux Seychelles, la densité a été estimée entre 20.2 et 42 individus par ha (Harper et Bunbury, 2015). Sur l'îlot Pouhou à Mayotte, la densité était estimée à 195 individus/ha en 2005, soit probablement la plus haute densité au monde (Rocamora et Said, 2005 ; Rocamora et Henriette, 2015). À Mayotte, le climat tropical, combiné à l'absence de prédateurs naturels des rats dans les mangroves, permettent de **suspecter de fortes densités** de rats dans ce milieu (Rocamora et Said, 2005).

⁴ Mayotte est constituée de 2 îles principales : Grande terre et Petite terre, ainsi que de plusieurs îlots.

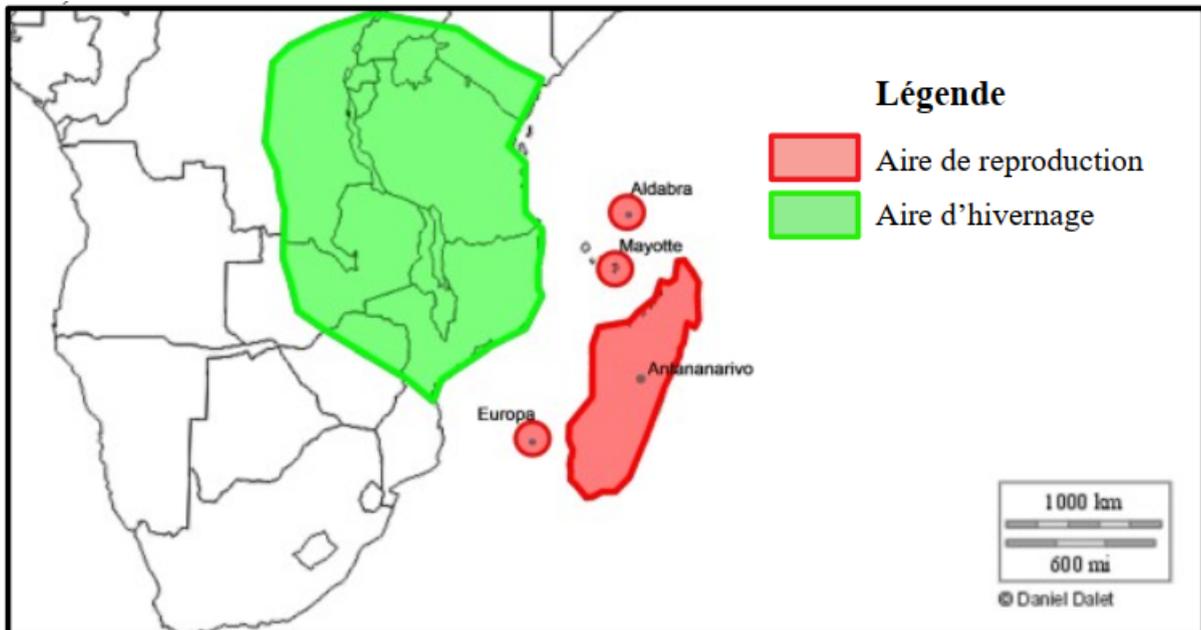


Figure 2 : Aire de répartition du Crabier blanc (*Ardeola idae*), un ardéidé qui se reproduit uniquement sur quatre îles (en rouge) : Madagascar, Aldabra aux Seychelles et sur deux territoires français, l'île d'Europa dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises et Mayotte. L'espèce est migratrice, la plupart des individus font le voyage jusqu'en Afrique de l'Est et Centrale après la nidification pour y passer l'hiver austral de juin à août (en vert). En 2018-2019, la population est estimée entre 2 000 et 6 000 individus et le nombre de couples nichant à Mayotte est estimé à environ 280 couples, soit presque 40% de la population mondiale. (Jeanne et al., 2018 ; Esnault, 2020 ; © Birdlife International 2013)

Lutte contre le rat

❖ À Mayotte

Au vu de la potentielle menace que représente une forte densité de rats pour le CB, le Conseil Scientifique du Patrimoine Naturel (CSPN) a accepté en **2019** la mise en place d'une **lutte contre le rat sous les héronnières mahoraises** (GEPOMAY 2020 b). En tant qu'animateur du **Plan National d'Action (PNA) en faveur du CB**, le **GEPOMAY** a pour mission la mise en place et le suivi de la lutte.

La littérature est riche d'exemple d'opérations d'éradication du rat (*i.e* élimination totale de l'espèce sur un site), avec des dizaines de réussites sur des îles à travers le monde (Yésou et al., 2013) (*e.g.* l'île Saint-Paul dans les TAAF en 1997 (Micol et Jouventin, 2002), île Tromelin en 2005 (Le Corre et al., 2015)). Néanmoins, l'éradication reste limitée à de petites surfaces (souvent <115 ha) (Yésou et al., 2013). Sur Mayotte, soit 37 400 ha, l'éradication ne peut être envisagée, d'autant qu'une recolonisation par des îlots autour de Grande Terre semble inéluctable. L'objectif de la lutte est donc ici de **contrôler la densité de rats sous un seuil soutenable pour le CB dans ses zones de reproduction en mangrove**.

Le type de lutte **principalement déployé à l'échelle du monde est la lutte chimique** avec notamment l'utilisation du Brodifacoum, un rodenticide anticoagulant responsable de 70 % des éradications réussies à travers le monde (Howald et al., 2007). Sur Mayotte, l'emploi régulier de produits chimiques a été proscrit par le Centre Universitaire de Formation et de Recherche de Mayotte (CUFR) qui **crain des effets sur des espèces non-cibles** comme le crabe. En effet, il a été démontré que les crabes consomment certains rodenticides et peuvent ainsi faire échouer une éradication (Holmes et al., 2015).

La **méthode mécanique** est elle aussi très utilisée, notamment en amont de la lutte chimique et est efficace sur de petites populations, sur des surfaces réduites et accessibles (Rocamora et Henriette, 2015). C'est donc ce type de lutte, souvent sélective et plus respectueuse de l'environnement que la lutte chimique, qui a été sélectionnée et **déployée sur trois sites de mangrove de moins de 3 ha chacun**.

Néanmoins, la plupart des pièges mécaniques classiques sont à déclenchement unique (Figure 3a,b,c). Ils représentent souvent un coût matériel, mais surtout un coût humain important (réactivation des pièges), qui est d'autant plus élevé que la zone est difficile d'accès (Rocamora et Henriette, 2015). Afin de réduire ces coûts, le GEPOMAY a sélectionné le **piège léthal A24** (Figure 3d). Un piège innovant commercialisé il y a une dizaine d'années par ©Goodnature, avec la particularité de diffuser un appât pendant 6 mois et de se **déclencher et se réarmer automatiquement jusqu'à 24 fois** (Gillies et al., 2012).

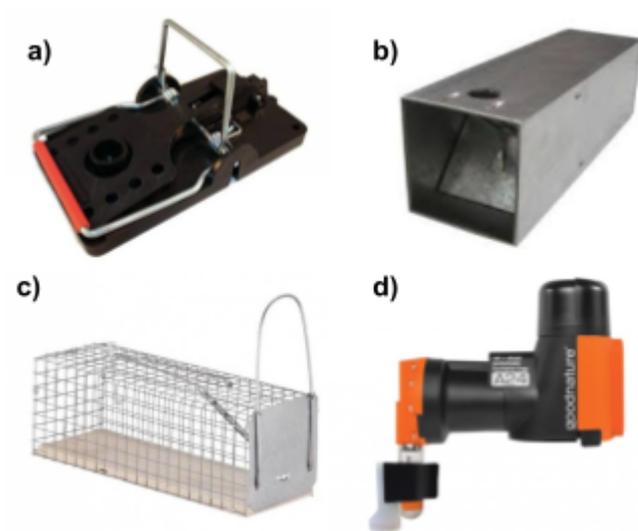


Figure 3 : Les différents types de pièges utilisés en lutte mécanique. Les pièges à déclenchement unique : tapettes à rat (a) piège Sherman (b) cage à rat (c), et le piège à 24 réarmements automatiques : piège A24 ©Goodnature (d). (GEPOMAY, 2020a)

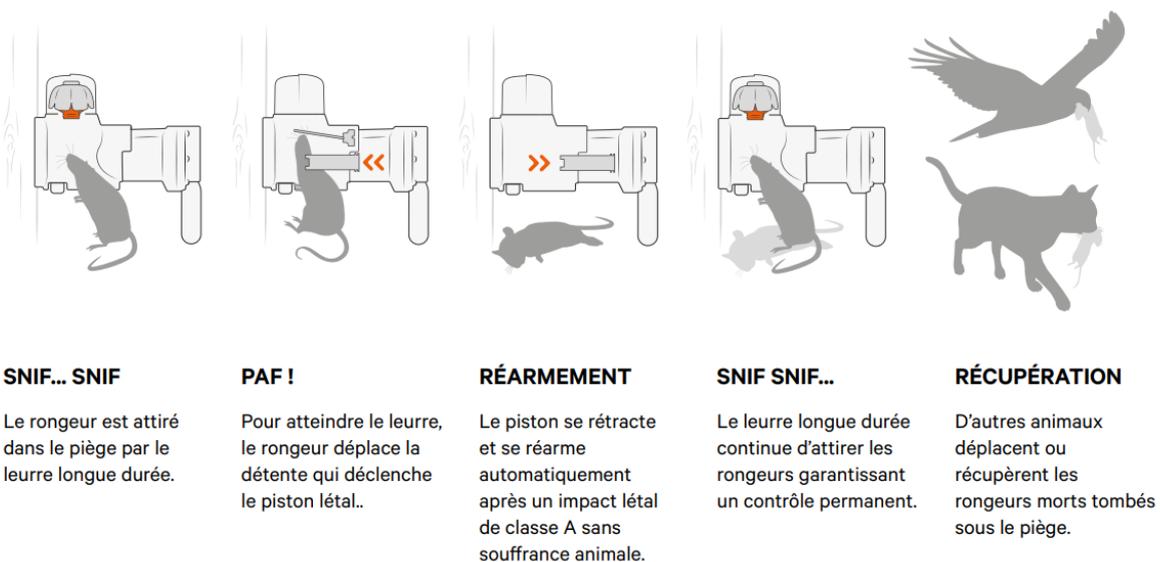


Figure 4 : Fonctionnement du piège A24 ©Goodnature. L'appât contenu dans le réservoir a été étudié pour attirer spécifiquement les rats pendant 6 mois. Pour déclencher le piège, le rat doit entrer dans un tunnel relativement étroit et pousser une languette. Celle-ci actionne un piston quelques centimètres plus bas et mène généralement à une mort immédiate du rat. Les animaux de petites tailles (musaraignes, insectes, ou petits crabes) qui pourraient être attirés, ne sont pas impactés par le déclenchement. (Gronwald et Russell, 2021 ; Quick start Guide Goodnature, consultable [ici](#)).

❖ Efficacité des pièges A24

La lutte avec A24 reste peu utilisée et donc peu documentée. Une synthèse de 136 projets de contrôle de rats sur des îles entre 1975 et 2015 indique que seuls 15 % étaient fondés uniquement sur du piégeage mécanique, et que parmi eux, seuls 7 % utilisaient des A24 (Duron et al., 2017). Depuis, d'autres études viennent compléter les connaissances sur le sujet, et les premiers résultats sur **l'efficacité des pièges A24** sont **contrastés**. Les pièges sont efficaces dans les hêtraies de Nouvelles Zélande, où ils font diminuer l'indice de présence des rats de 68% à 0% en 4 mois sur 200 ha (Carter et Peters, 2016). Ils sont aussi efficaces lorsqu'ils sont utilisés en combinaison d'un anticoagulant, dans 5 ha de forêts isolées de O'ahu (Hawaï, USA) (Shiels et al., 2019). Mais la lutte avec A24 n'a pas permis de passer en dessous du seuil des 20% en 2.5 ans et apparaît bien moins efficace que la lutte chimique sur 50 ha du Windy Hill Sanctuaire en Nouvelle-Zélande (Gilbert, 2018). Certaines caractéristiques du produit sont mises en cause comme la rapide altération des appâts, alors rendus moins attractifs. Une réticence des rats face au piège est aussi observée (*i.e.* 11 à 15 courtes visites individuelles avant qu'un individu entre suffisamment à l'intérieur et active le piège), ce qui serait à l'origine d'une faible efficacité des pièges dans un milieu à faible densité de rats (Ogden, 2018 ; Gronwald et Russell, 2021). En outre, si ces caractéristiques sont les mêmes pour tous les A24, c'est **le protocole mis en place** (*e.g.* la période de déploiement, la densité de pièges et leur disposition) qui **détermine l'issue de la lutte**. Il n'est pas impossible que selon l'habitat les protocoles optimaux diffèrent. Il est donc **indispensable d'étudier l'impact du déploiement des A24 sur son aire d'étude** pour l'adapter au mieux.

Les précédentes études utilisent différents indices pour évaluer l'efficacité des A24 sur le rat : des indices directs comme le nombre de déclenchements des A24 (donc nombre de rats tués) (Ogden, 2018), parfois combiné à des indices indirects, qui consistent à suivre l'évolution de la densité et/ou de l'activité des rats dans la zone via des caméras trap (Gronwald et Russell, 2021) ou des pièges à empreintes (Shiels et al., 2019 ; Gilbert, 2018). À notre connaissance, **aucune étude sur les A24 n'a évalué leur efficacité en utilisant des indices d'activité basés sur la consommation de chewcards** (carte à empreintes de dents) et sur une estimation de **densité basée sur une CMR**. De plus, aucune de ces études publiées n'a testé l'efficacité des A24 en mangrove.

Problématique, objectifs et hypothèses

Cette étude évalue, pour la première fois, l'efficacité du déploiement de pièges létaux **A24 dans la lutte contre le Rat noir (*Rattus rattus*) en mangroves mahoraises**. L'objectif de cette étude est de faire un premier état de la densité de rats sur trois mangroves et d'estimer l'effet du déploiement de A24. Si la lutte s'avère efficace, il est attendu une diminution significative de la densité suite à la lutte.

Une **comparaison de ces résultats avec ceux de deux autres indicateurs** moins coûteux : nombre de déclenchements A24 (indicateur du nombre de rats tués), et consommation de chewcards (indicateur d'activité du rat, voire d'abondance relative), permet de compléter l'analyse et de déterminer les **indicateurs les plus efficaces**. Une **optimisation du suivi** peut être proposée en conséquence.

L'étude tente aussi de déterminer de manière indirecte si le rat a un effet délétère sur le CB. Dans cet objectif, l'impact du Rat noir sur les populations de CB est évalué en comparant un indice approximant le succès reproducteur du CB avec et sans lutte contre le rat. Une tendance à la hausse de cet indice de succès reproducteur est attendue pour confirmer l'impact négatif du Rat noir sur le Crabier blanc.

L'objectif à long terme étant d'obtenir des éléments d'**optimisation de lutte** contre le rat dans ce type de milieu, et d'aboutir plus particulièrement à une lutte efficace pour la conservation du Crabier blanc. Une estimation du **domaine vital du Rat noir** sur ces sites devrait permettre d'**optimiser l'espacement entre A24**.



Figure 5 : Héronnière d'Ironi-bé. Les hérons qui nichent en mangrove créent de petits patches blancs au-dessus des palétuviers a) (©DroneGo). La qualité des photos permet d'identifier les CB adultes et juvéniles et de noter la présence de leurs nids, c'est-à-dire lorsque le nid est occupé par un adulte CB b) (©GEPOMAY)

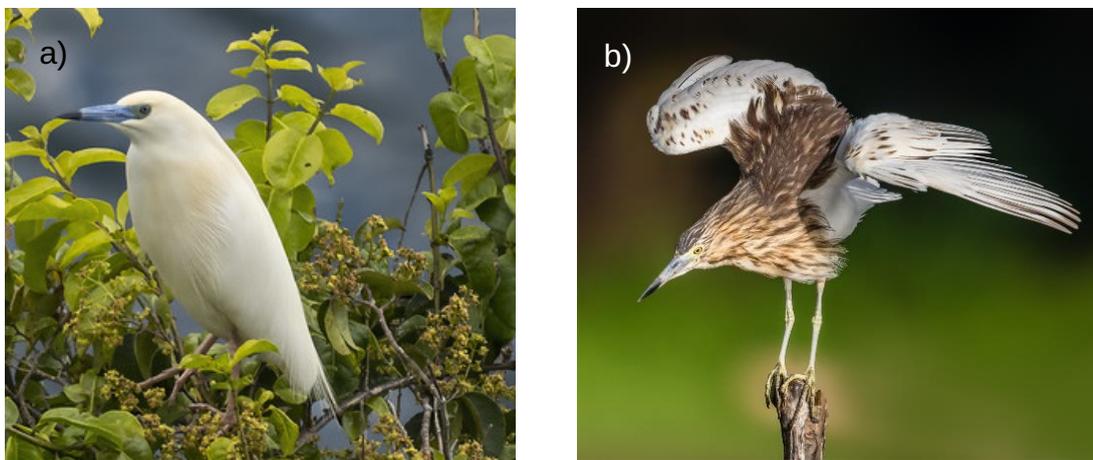


Figure 7 : Apparence du Crabier blanc en plumage nuptial : l'oiseau devient entièrement blanc, son bec est bleu azur plus ou moins vif à pointe noire (a) ; ainsi qu'en plumage inter-nuptial ou immature : le plumage est beaucoup plus discret et mimétique, les parties supérieures du corps sont striées de bruns, le ventre et la queue sont de couleur blanchâtre, les pattes verdâtres à jaunâtres, le bec est gris-vert à pointe noire et l'iris est jaune (b). Il n'existe pas de dimorphisme sexuel. (©GEPOMAY)

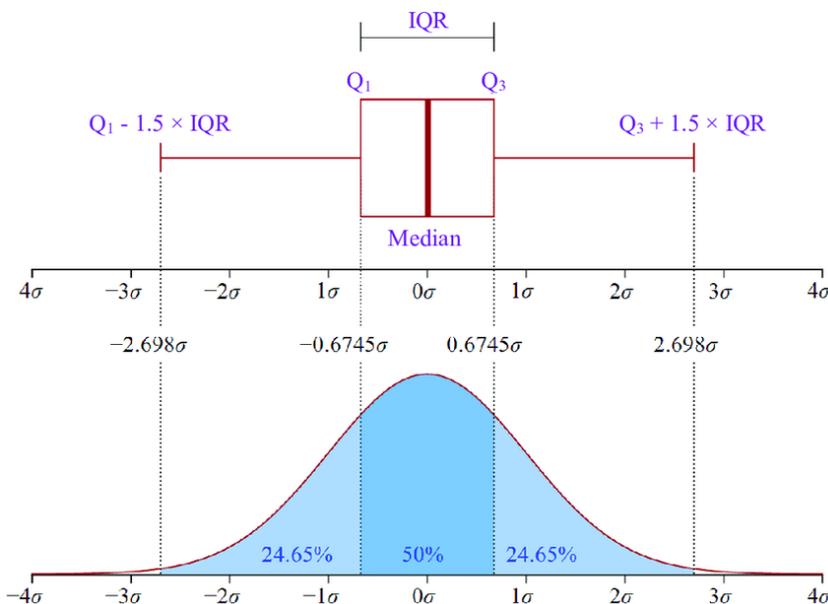


Figure 8 : Exemple d'un Boxplot selon une fonction de densité de probabilité de $N(0, \sigma^2)$. Une comparaison visuelle de deux distributions de valeurs utilise généralement les bornes $[Q1 ; Q3]$ ou $[Q1 - 1,5 \times IQR ; Q3 + 1,5 \times IQR]$ pour identifier des différences notables (Yang et al., 2018).

Matériel et Méthode

Le traitement et l'analyse des données ont nécessité l'utilisation du tableur LibreOffice version 7.3.2.2 (2000-2022) et du logiciel Rstudio version 1.3.1093 (2009-2020).

Indice du succès reproducteur du Crabier blanc

Sur Mayotte, les CB nichent exclusivement en mangrove, sur la **cime des palétuviers** (Figure 5a). Les populations sont suivies par **photocomptage par drone depuis 2014**, à raison d'un passage drone (**session**) **par mois** sur la période de reproduction soit de **septembre à février**. Au total, **huit héronnières** ont été identifiées et suivies, dont trois à forts effectifs et suffisamment accessibles pour qu'une **lutte mécanique contre le rat y soit réalisée** : Chiconi (lutte en saison de reproduction 2018-19 et 2019-20), Ironi-bé et Bouyouni (lutte en saison de reproduction 2021-22) (GEPOMAY 2020 a) (Figure 6).

La qualité des photos des colonies permet de **distinguer** les CB **adultes** au bec bleu et plumage blanc, des **juvéniles** ou d'autres hérons comme le garde bœuf (*Bubulcus ibis*) avec lesquels ils nichent en colonie mixte (Jeanne et al., 2018) (Figure 5b et 7). Chez le CB, la taille moyenne des nichées est de deux à quatre petits et l'incubation dure environ 20 jours, assurée par les deux sexes (Pruvot et al., 2020).

Un **indicateur approximatif du succès reproducteur (iSR)** est calculé pour chaque année et pour chaque site depuis 2014 lorsque la héronnière est active. Il correspond au **ratio du nombre de juvéniles sur le nombre de couples**. Le nombre de juvéniles conservé est celui maximum relevé lors d'un passage parmi l'ensemble des sessions de la saison. Le nombre de couples est lui estimé par le nombre maximum de nids différents occupés par des CB au cours de la saison.

L'évolution des iSR de chaque site au cours du temps et selon le traitement (avec ou sans lutte) est représentée graphiquement, notamment par un boxplot dont les bornes permettent d'identifier visuellement des différences notables (Figure 8). Une **ANCOVA** sur l'ensemble des iSR des sites depuis 2014 permettra d'indiquer s'il y a une interaction statistiquement significative entre le traitement (lutte ou sans lutte) et le SR, avec ajustement des effets des variables : colonie (*i.e* site) et année.

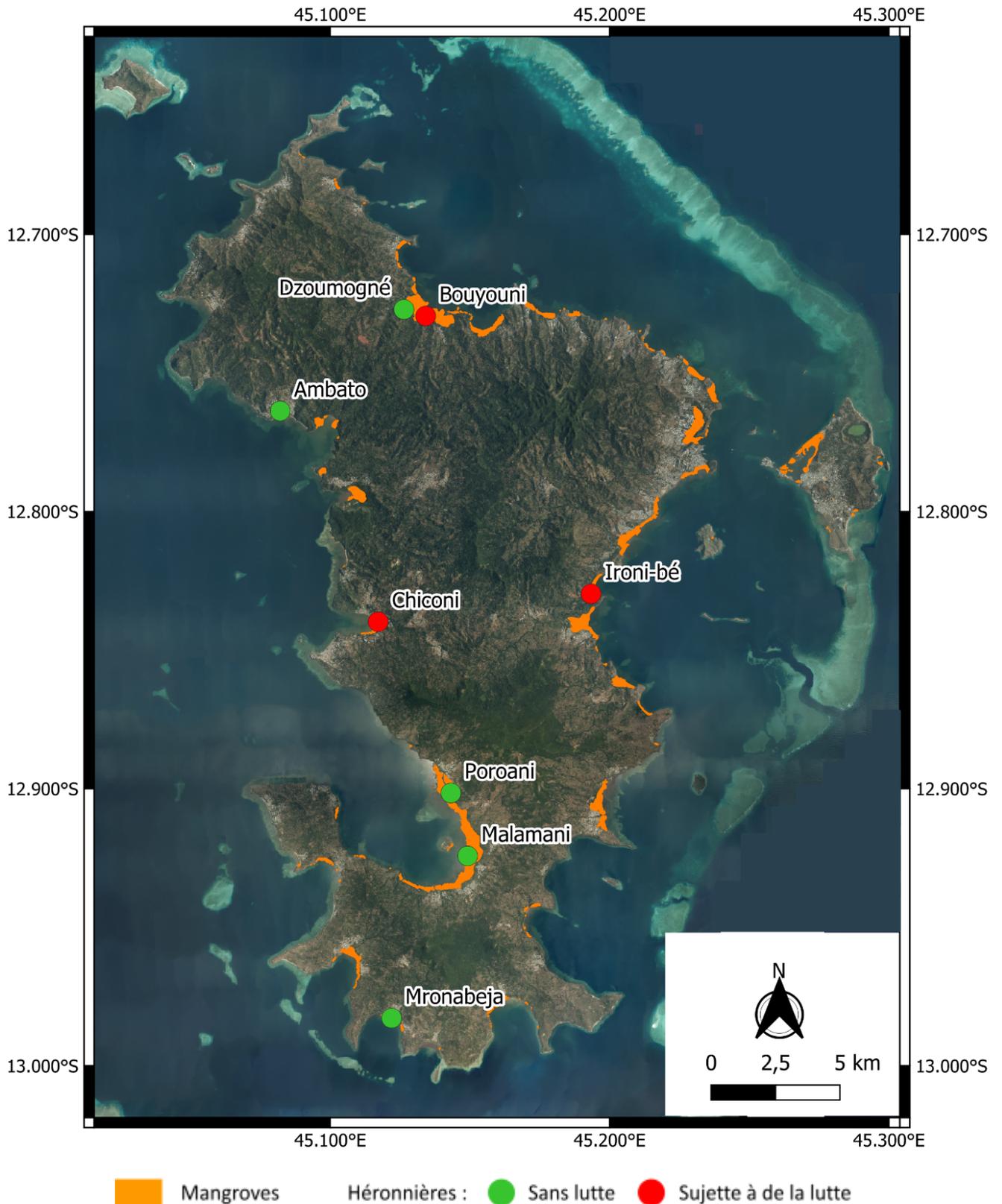


Figure 6 : Localisation de l'ensemble des héronnières connues accueillant du CB à Mayotte. En rouge celles qui ont été sujettes à la lutte contre le rat : Chiconi (lutte en saison de reproduction 2018-19 et 2019-20), Ironi-bé et Bouyouuni (lutte en saison de reproduction 2021-22). (IGN BD Ortho 2016 ; GEPOMAY, 2022).

Lutte contre le rat et suivi des populations

Les populations de Rats noir sont étudiées dans trois mangroves accueillant des héronnières et sur lesquelles ont été mis en place de la lutte contre le rat : Chiconi (suivi depuis octobre 2019), Ironi-bé (depuis février 2020) et Bouyouni (depuis août 2021). La densité des rats, leur domaine vital et leur démographie sur ces sites n'a jamais été mesurée. La figure 9 représente l'ensemble des déploiements théoriques pour le plan de lutte contre le rat et son suivi.

❖ Déploiement des A24 et suivi des déclenchements

Sur chaque site, **30 A24** sont fixés sur le tronc de palétuviers, à une hauteur supérieure à deux mètres pour éviter tout contact avec l'eau lors des marées. Pour assurer une lutte efficace, **l'espacement des pièges doit être inférieur au diamètre du domaine vital des rats** (Mogan, 2004 dans Ringler et al., 2014). Le premier protocole de lutte mis en place sur **Chiconi** correspond à la disposition des pièges sur **2.71 ha de mangrove**, chacun espacés en moyenne de **50 mètres**, soit la distance d'espacement conseillée par le fournisseur ©Goodnature. Sur **Ironi-bé** et **Bouyouni** la lutte a été intensifiée à proximité des héronnières, soit un **espacement de 10 mètres entre les A24 sous la héronnière et de 30 mètres en périphérie**, sur une surface totale de déploiement d'environ **1 ha** (Figure 10).

Les pièges sont déployés à minima **pendant la période de reproduction des CB** (septembre à février) : durant 16 mois consécutifs sur Chiconi (mi-octobre 2019 à mi-février 2022) et 6 mois sur Ib et By (septembre 2021 à fin février - début mars 2022) (Annexes 1 et 2).

Chaque A24 dispose d'un compteur de déclenchements. Le **nombre de déclenchements** a déjà été utilisé dans d'autres études sur l'efficacité des A24 et semblait indiquer fidèlement l'abattage d'un rat (>90% des déclenchements correspondaient bien à la mort d'un rat) (Gronwald et Russell, 2021). Pour cette étude, une session de relève du nombre de déclenchements des 30 A24 est réalisée **une fois par mois**, lors des missions de maintenance des pièges.

Pour chaque site, le nombre total de déclenchements de l'ensemble des A24 déployés fournira une estimation du nombre de rats tués sur la période de lutte. Compte tenu de la présence de variations dans le nombre de pièges relevés par session (*e.g.* vol de A24) ainsi que dans la durée entre deux relevés, une **moyenne du nombre de déclenchements par A24 par jour** est calculée **pour chaque session de relève**. Celle-ci est accompagnée d'un intervalle de confiance à 95% (IC95%). Un test **ANOVA de Welch** permet d'indiquer si des différences significatives ressortent entre les moyennes des différentes sessions. Si tel est le cas, le **test post hoc de Games-Howell** (non paramétrique) permet de déterminer les sessions dont la moyenne diffère significativement des autres.

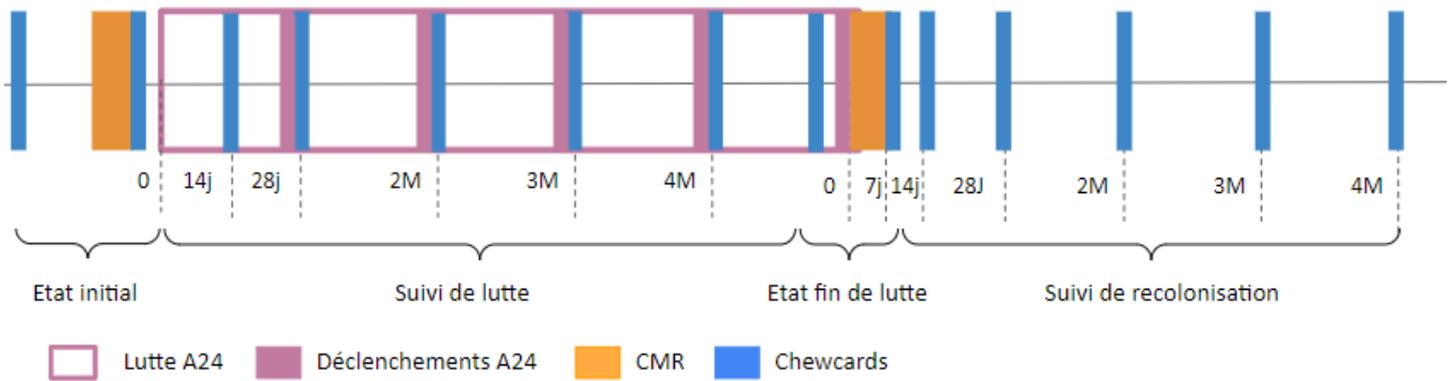


Figure 9 : Frise du déploiement théorique des pièges A24 pour la lutte contre le rat (environ 6 mois), et son suivi via le nombre de déclenchements des A24 (pendant la lutte), CMR (avant et en fin de lutte), chewcards (avant, pendant et après la lutte). J = jour, M = Mois.

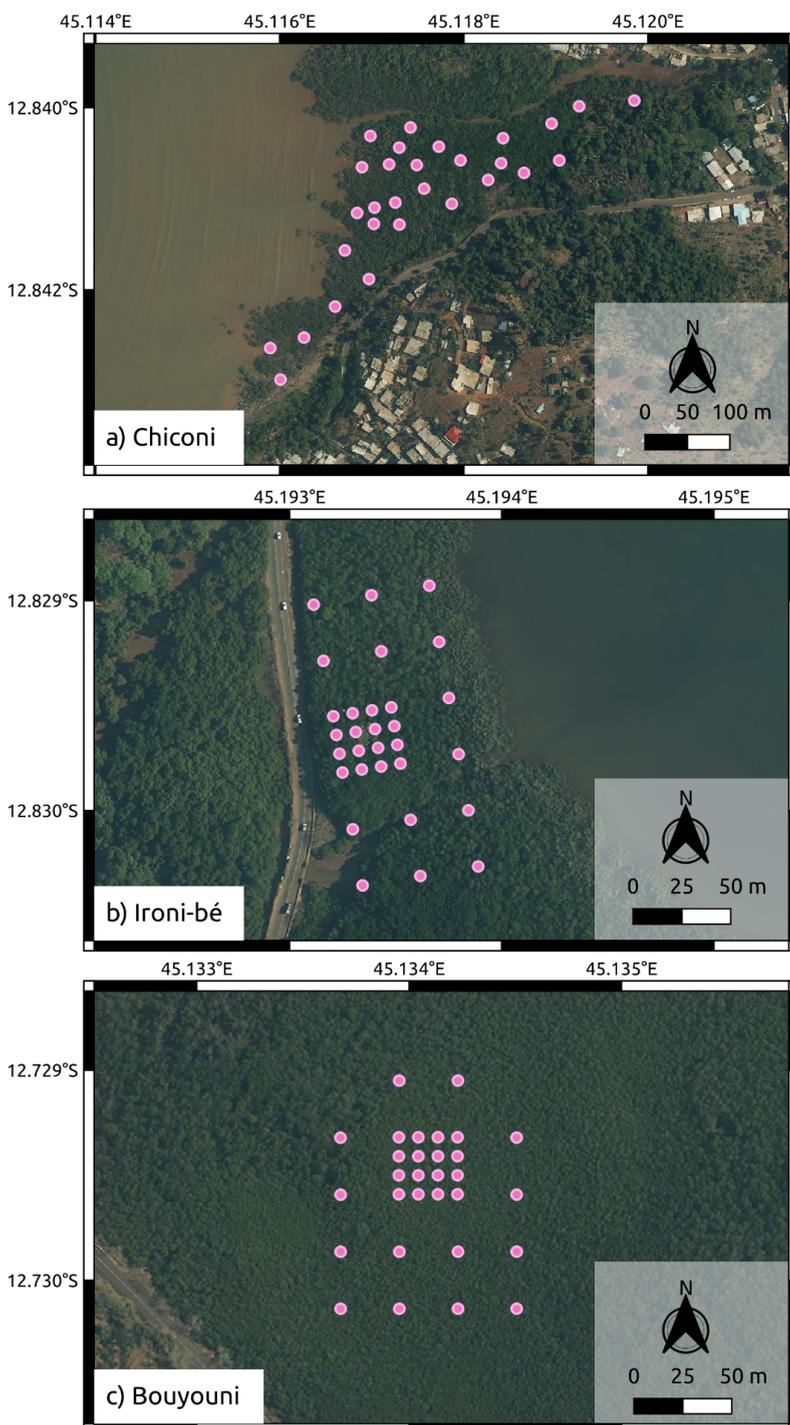


Figure 10 : Répartition des 30 pièges A24 sur les trois sites d'études : Chiconi (a), Ironi-bé (b) et Bouyouni (c). Sur Chiconi les A24 sont espacés d'environ 50 mètres et répartis sur 2.71 ha. Sur Ironi-bé et Bouyouni les A24 sont plus rapprochés à proximité des héronnières (30 mètres en périphérie et 10 mètres sous les héronnières) et répartis sur environ 1 ha.

❖ Suivi par Capture-Marquage-Recapture (CMR)

La CMR consiste ici à suivre la capture de rats marqués individuellement pour estimer leur densité, dans une aire et à un instant donné. La CMR peut aussi servir pour l'estimation de paramètres comme le domaine vital du rat (Ringlers et al., 2014). Ici des "pièges à rat" (Figure 3c) appâtées avec l'appât rat ©Goodnature, permettent la capture non létale d'individus. Sur chaque site sont déployées **36 cages espacées de 15 mètres chacune sur 0.56 ha** (Figure 11). Une session de CMR consiste à 6 jours de relève des pièges consécutifs. Chaque rat capturé est bagué à une oreille, pesé et sexé, avant d'être relâché au point de capture. A chaque recapture le numéro de bague du rat est noté. Une **session de CMR a lieu avant et après la lutte A24**, soit en août et février/mars. A noter que pour des raisons de manques de personnels dû au Covid, la session de CMR post lutte sur Chiconi a été réalisée 1 mois après l'arrêt de la lutte (Annexes 1 et 2).

➤ Estimation de la densité

Les données spatialisées de la CMR ne permettent pas de connaître la densité exacte de la population de rats car il est impossible de définir avec exactitude la taille de la zone de capture. Cette zone englobe l'ensemble des centres des domaines vitaux des rats qui peuvent se situer aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'aire de déploiement des cages. Ainsi, pour obtenir une estimation de la densité plus juste, celle-ci a été calculée à l'aide du package **SECR** (Spatially explicit capture-recapture) **sous le logiciel R** (Borchers et Efford 2008 ; Efford et al., 2009). Cette méthode consiste à construire deux modèles : un modèle de détection, qui correspond à la probabilité de détection d'un rat en fonction de la distance à son centre de domaine vital et un modèle de distribution de type semi-normal. La combinaison de ces deux modèles par maximisation de la vraisemblance sur les histoires de captures permet ainsi d'estimer le nombre de centres de domaines vitaux présents à l'intérieur et autour du de l'aire de déploiement des cages et d'estimer ainsi plus justement la densité de rats. Le **test de fermeture d'Otis** et al., (1978) est utilisé afin de s'assurer de la fermeture des populations (*i.e.* mouvements migratoires, natalité et mortalité sont tous nuls au cours des 6 jours de relève). La répartition des individus dans le milieu est supposée homogène. L'ensemble des données de tous les sites et de toutes les sessions (avec et sans lutte) sont rentrées et **différents modèles** sont lancés en faisant varier les paramètres $g(0)$ (probabilité de capture au centre du domaine vital), σ (paramètre d'échelle) et D (densité), selon les sites, les sessions, et le groupe (sexe). Le critère d' Akaike corrigé pour les échantillons de faible taille

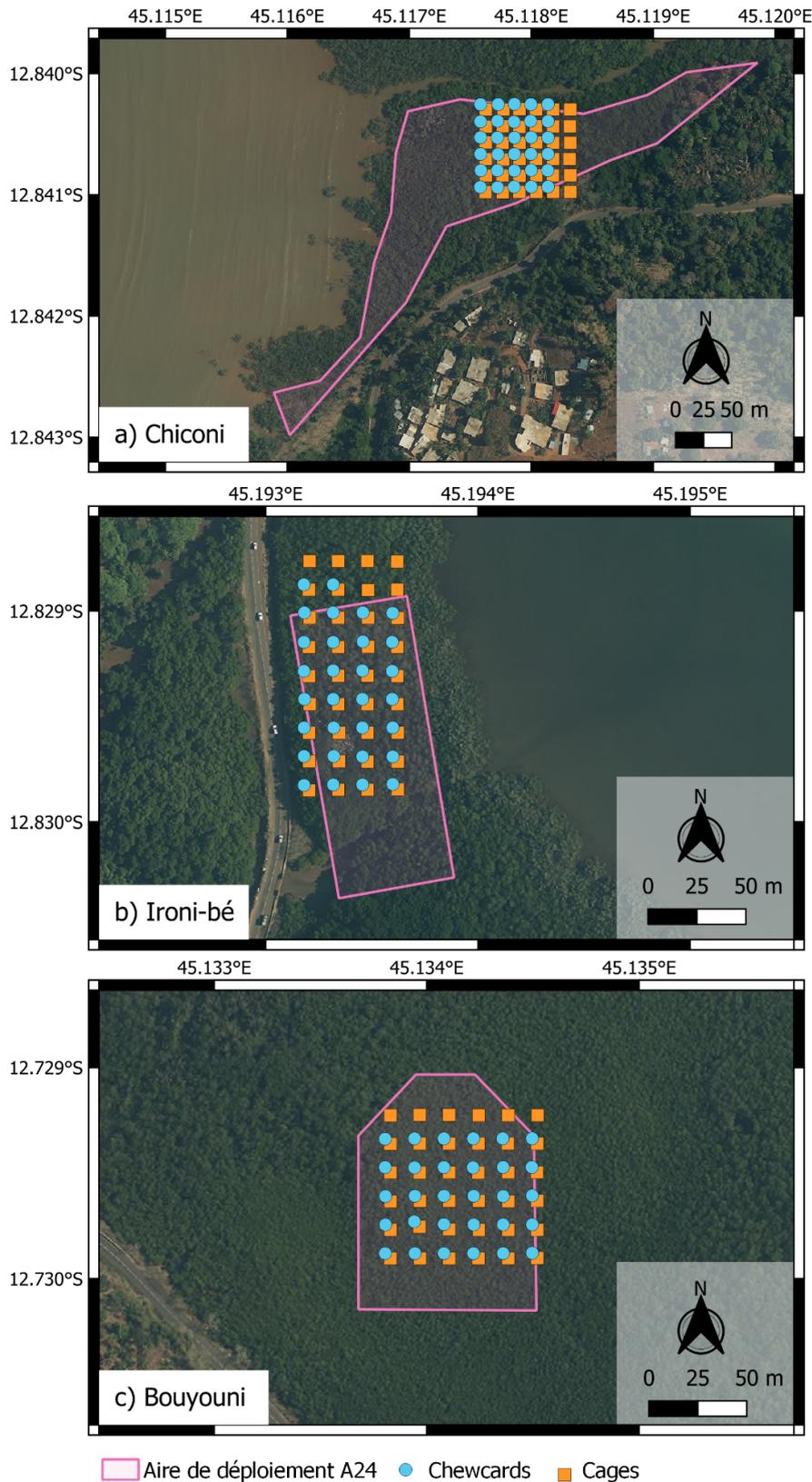


Figure 11 : Répartition théorique des 30 Chewcards (CC) en bleu et des 36 cages en orange sur les sites d'études : Chiconi (a), Ironi-bé (b) et Bouyouni (c). Les CC et les cages sont espacées de 15 mètres chacune et réparties sur respectivement 0.45 ha et 0.56 ha. Elles se trouvent à l'intérieur ou à proximité de l'aire de déploiement des pièges A24, dont le compteur de déclenchement est aussi utilisé comme outil de suivi.

(AICc ; Burnham et Anderson, 2002) est utilisé pour **sélectionner le modèle** qui explique le mieux la variation des données.

Dans un premier temps, l'**effet de la saisonnalité** est testé en comparant la densité de rats estimée sur Ironi-bé en saison humide (mars) à celle en période sèche (août) de la même année (2021), soit avant la mise en place de la lutte. Les estimations sont considérées comme significativement différentes lorsque les intervalles de confiance à 95 % des densités estimées ne se chevauchent pas, comme proposé par Besançon et Dragicevic (2017) et Gardner et Altman (1986) et comme utilisé dans une étude sur la densité de rats par Wilson et al. (2007).

Dans un second temps, l'**effet de la lutte sur les rats** est évalué : les estimations de densité par CMR **avant et après lutte** sur le même site sont comparées selon l'indice de chevauchement des **IC95%** ainsi qu'avec un test **d'ANCOVA** sous R corrigeant la densité post-lutte de chaque site en fonction de sa densité à l'état initial, comme utilisé par Ruscoe et al., (2013).

➤ **Estimation du domaine vital**

Le package SECR permet d'estimer le domaine vital des populations de rats selon le meilleur modèle sélectionné. Le domaine vital correspond à une aire comprenant une probabilité d'occurrence d'un animal pendant une période de temps définie (Horne et Garton 2006 dans Ringler, 2014). La probabilité de capture d'un individu dans un piège est modélisée comme une fonction de détection décroissante $g(r)$, où r est la distance du piège par rapport au centre du domaine vital de l'animal. Les diamètres des domaines vitaux HR95 et HR50 ("Home Range 95 et 50") sont estimés, et correspondent à la distance à partir du centre du domaine vital, pour laquelle il y a respectivement 95% et 50% de probabilité d'occurrence du rat. Afin qu'un minimum d'un piège soit à disposition de chaque rat sur chacun des sites, c'est le **diamètre HR50** (*i.e.* le cœur du domaine vital), **qui doit définir de manière prudente l'espacement maximal des pièges** (Moors et al., 1992 ; Ringler et al., 2014).

❖ **Suivi par la consommation de chewcards**

Les chewcards utilisées ici sont des cartes en plastique renfermant le même appât attractif que celui des pièges A24. En venant mordre la carte, le rat dépose ses empreintes de dents et permet donc d'attester de la présence de l'espèce dans la zone de dépôt (Figure 12).

Sur les trois sites de lutte, une session est réalisée environ tous les mois (Figure 9 ; Annexes 1 et 2) et consiste à déployer **30 chewcards**, espacées de 15 mètres chacune et les récupérer 48h après leur dépôt (Figure 11).

La proportion de chewcards consommée par le rat dans une aire donnée peut être utilisée comme un indice d'activité, voire d'abondance relative, car il est fortement corrélé à indice d'abondance par tunnel à empreinte (Ruffell et al., 2015) et de capture par cage (Sweetapple et Nugent, 2011).

Les proportions des différentes sessions sont comparées via un test du Chi2 ou test de Fisher (non paramétrique). Les sessions **avant la lutte (état initial)** et celles après l'arrêt de la lutte non significativement différentes de l'état initial (**recolonisation "totale"**) forment le groupe de sessions dites "**sans lutte effective**". Toutes les sessions comprises entre J+28 après le début de la lutte et l'arrêt de la lutte forment le groupe de sessions dites "**avec lutte**". **L'effet de la lutte** est évalué en comparant la proportion **moyenne** de chewcards consommées par les rats des sessions "sans lutte effective" avec la proportion moyenne de celles "avec lutte". Les proportions moyennes sont arrondies pour obtenir un effectif de chewcard consommées sur les 30 déployées de chaque site.

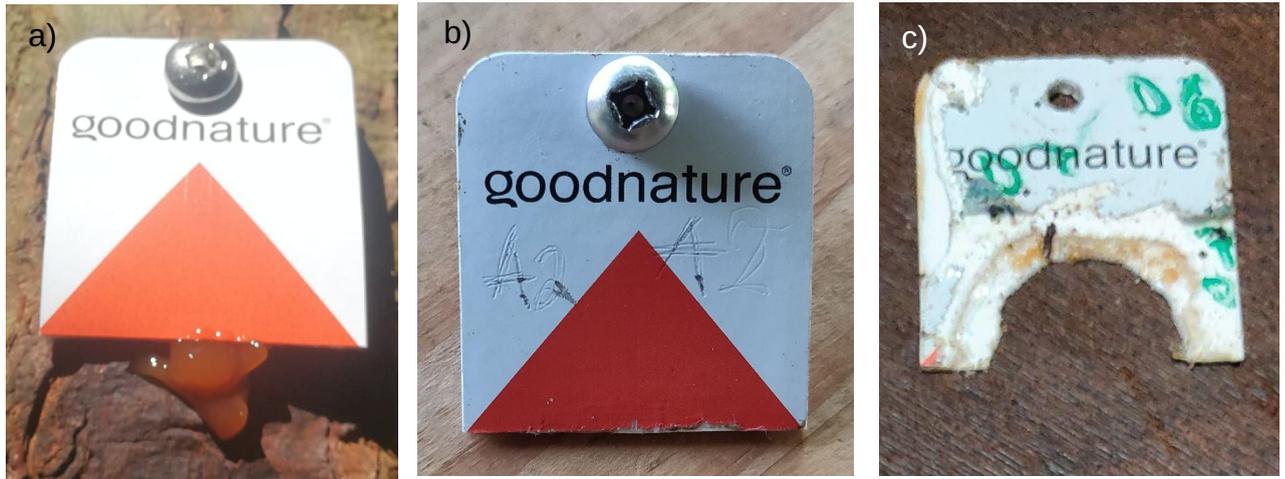


Figure 12 : Apparence des chewcards et indice de consommation par le rat : l'appât s'échappe d'une chewcard intacte qui vient d'être fixée sur un palétuvier (a), chewcard attaquée mais il est impossible d'identifier son consommateur (b), chewcard fortement attaquée avec empreinte de dents visibles indiquant la présence de rat (c).

Résultats

Suivi rat

❖ Déclenchements A24

Sur **Chiconi** 717 déclenchements ont été relevés en 400 jours de lutte. Le nombre moyen de déclenchements varie significativement avec le temps (ANOVA de Welch : $df = 14$, $p = 0.059$). Il semble légèrement diminuer au cours de la lutte (Régression linéaire avec coefficient de Pearson = 0.49), avec une différence significative entre le début (10/12/19) et la fin de la lutte (2/12/20), à la même période de l'année (décembre) (Test post hoc de Games-Howell : $p = 0.042$). En moyenne, chaque A24 est déclenché 0.06 fois par jour sur la période de lutte, soit 1.8 déclenchement par jour sur les 2.71 ha d'aire de déploiement des 30 A24 (Figure 13 a).

Sur **Ironi-bé** 319 déclenchements ont été relevés en 147 jours. Il n'y a pas de tendance continue à la baisse avec la lutte. Aucune différence significative entre les sessions n'apparaît (ANOVA Welch : $df = 6$, $p = 0.061$). En moyenne, chaque A24 est déclenché 0.08 fois par jour, soit 2.4 déclenchements par jour sur les 1 ha d'aire de déploiement des 30 A24 (Figure 13 b).

Sur **Bouyouni** 471 déclenchements ont été relevés en 102 jours. Il n'y a pas de tendance continue à la baisse avec la lutte. Le nombre de déclenchement est constant sur toute la période de lutte (ANOVA de Welch : $df = 4$, $p = 0.711$). En moyenne, chaque A24 est déclenché 0.11 fois par jour, soit 3.3 déclenchements par jour sur les 1 ha d'aire de déploiement des 30 A24 (Figure 13 c).

A noter que le nombre moyen de déclenchements par A24 par jour **varie selon les sites** (ANOVA de Welch : $d.f = 2$, $F : 224$ $p : 0.006$). Il est plus important sur Bouyouni (0.11) puis sur Ironi-bé (0.08) et est le plus faible sur Chiconi (0.06), avec une différence significative entre Bouyouni et Chiconi (Test post hoc de Games-Howell entre Chiconi et Bouyouni : $p = 0.014$).

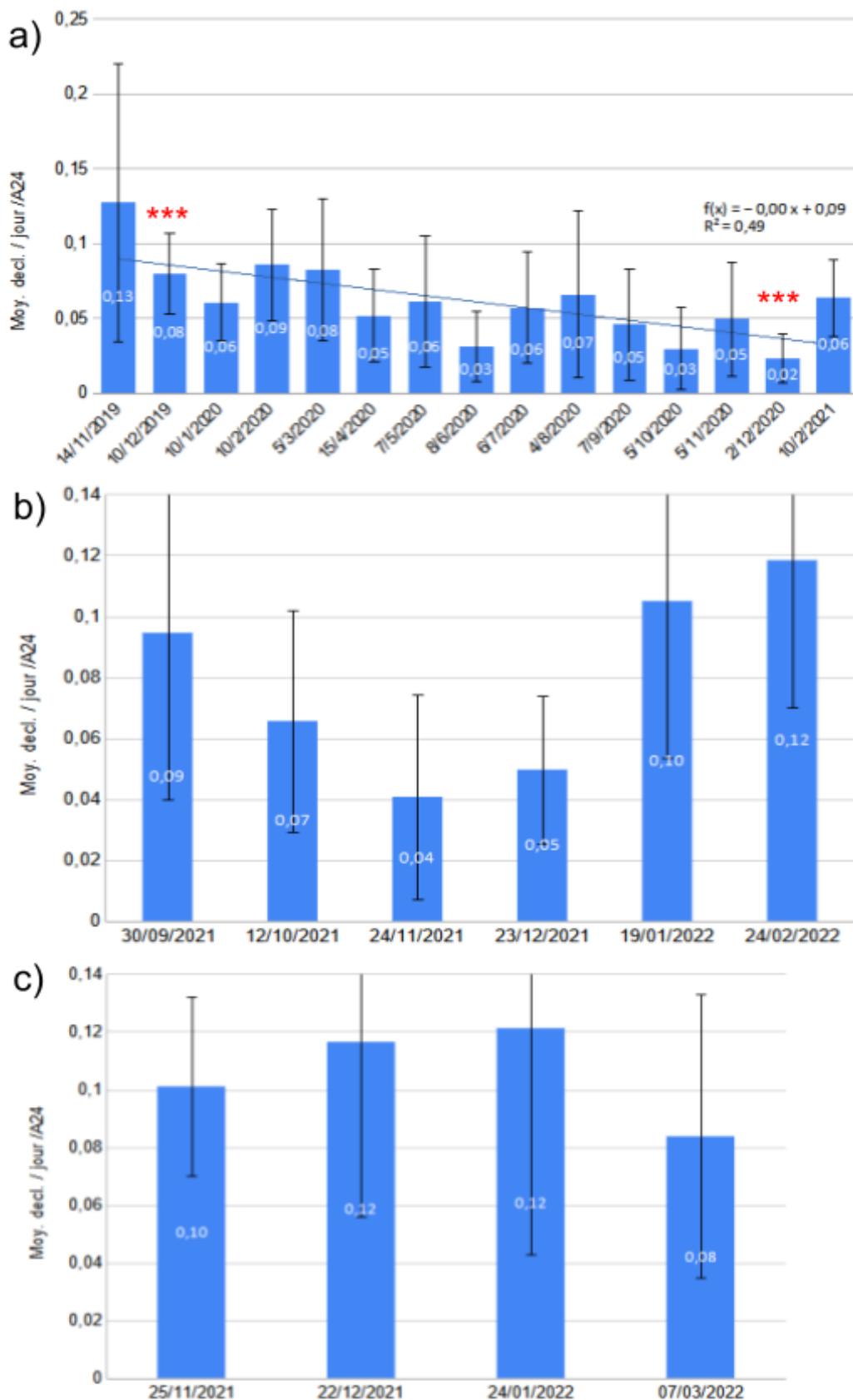


Figure 13 : Évolution du nombre moyen de déclenchements par A24 par jour sur les sites de Chiconi a) Ironi-bé b) et Bouyouni c). Le nombre moyen de déclenchement semble légèrement diminuer sur Chiconi (ANOVA de Welch : $df = 14$, $p = 0.059$; test post hoc de Games-Howell montrant une différence significative entre les deux sessions notées “ *** “, $p = 0.042$; Régression de Pearson avec $R^2=0.49$). Le nombre moyen de déclenchement semble rester constant sur Ironi-bé (ANOVA de Welch : $df = 6$, $p = 0.061$) et Bouyouni (ANOVA de Welch : $df = 4$, $p = 0.711$). Avec barres d’erreur : intervalles de confiance 95%.

❖ Populations de rats via CMR

Hormis pour la session post lutte sur Ironi-bé, sur chaque site et pour chaque session, plus de 18 recaptures sont réalisées avec plus de 10 rats différents marqués et à minima un rat recapturé 4 fois ou plus par session (Annexe 3).

Le modèle sélectionné pour la suite des résultats est celui avec la plus faible AICc, soit 2191.41, avec un $\Delta AICc$ de 2.471 avec le prochain modèle. Il s'agit d'un modèle qui fait varier $g(0)$ (la probabilité de capture au centre du domaine vital du rat), et sigma (le facteur d'échelle), selon le site (Annexe 4).

➤ Estimation du domaine vital

Les diamètres des domaines vitaux des rats estimés **varient selon les sites** : il est plus grand sur Bouyouni, puis sur Ironi-bé et est le plus réduit sur Chiconi. L'espacement des A24 est bien inférieur au diamètre du domaine vital sur Ironi-bé et Bouyouni mais il est supérieur sur Chiconi (Tableau 3).

➤ Estimation de la densité

Une comparaison inter site permet de constater que l'**état initial diffère selon les sites**. La densité est la plus élevée sur Chiconi (29 rats/ha), puis sur Bouyouni (16 rats/ha) et enfin elle est la moins élevée sur Ironi-bé (8 rats/ha). Seules les densités estimées sur Chiconi et Ironi-bé sont différentes significativement selon l'IC 95% (Figure 15)..

■ Effet saisonnalité

Comparativement aux estimations en saison humide, la densité de rats sur Ironi-bé en saison sèche tend à légèrement diminuer mais de manière non significative selon IC95% (Figure 14).

■ Effet de la lutte

Avec la lutte, une **tendance à la baisse de la densité** de rats est observée sur les **trois sites**. Avec une diminution de la moitié de la densité sur Chiconi et Ironi-bé, soit respectivement 13 rats/ha et 4 rats/ha de moins, et une diminution moindre de 3 rats/ha sur Bouyouni. Néanmoins, si l'on se fie aux IC95%, ainsi qu'aux résultats de l'ANCOVA, **aucune différence entre état initial et post lutte n'est significative**, malgré une p-value proche du seuil de 5% (ANCOVA : $df = 3$; $p = 0.051$) (Figure 15).

	Domaine vital estimé (HR95) (IC95)	Coeur de domaine vital estimé (HR50) (IC95)	Espacement A24 réel
Chiconi	67 (55-81) m	27 (22-33) m	50 m
Ironi-bé	90 (74-110) m	37 (30-45) m	10 (héronnière) ; 30 m
Bouyouni	133 (99-179) m	54 (40-73) m	10 (héronnière) ; 30 m

Tableau 3 : Diamètres des domaines vitaux HR95 et HR50 du rats estimés à partir des données CMR, via le package SECR sous R, modèle retenu : (g0~site, sigma~site). Les estimations sont arrondies au mètre près, avec valeur de l'intervalle de confiance 95%(IC95). Ces estimations varient selon les sites et sont mises en parallèle avec l'espacement des A24.

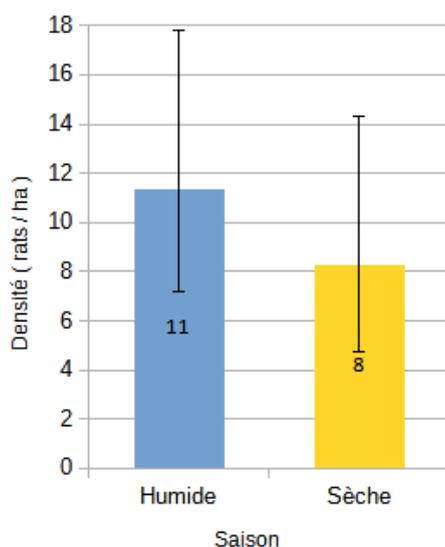


Figure 14 : Densité (rats/ha) sur le site d'Ironi-bé avant la mise en place de la lutte. Densité estimée par CMR (package SECR sous R). Modèle retenu (g0~site, sigma~site) : Barres d'erreur : Intervalle de confiance à 95%. Comparé à la saison humide (mars 2021), la densité en saison sèche (août 2021) a légèrement diminué mais de manière non significative selon l'indice de chevauchement des barres d'erreur.

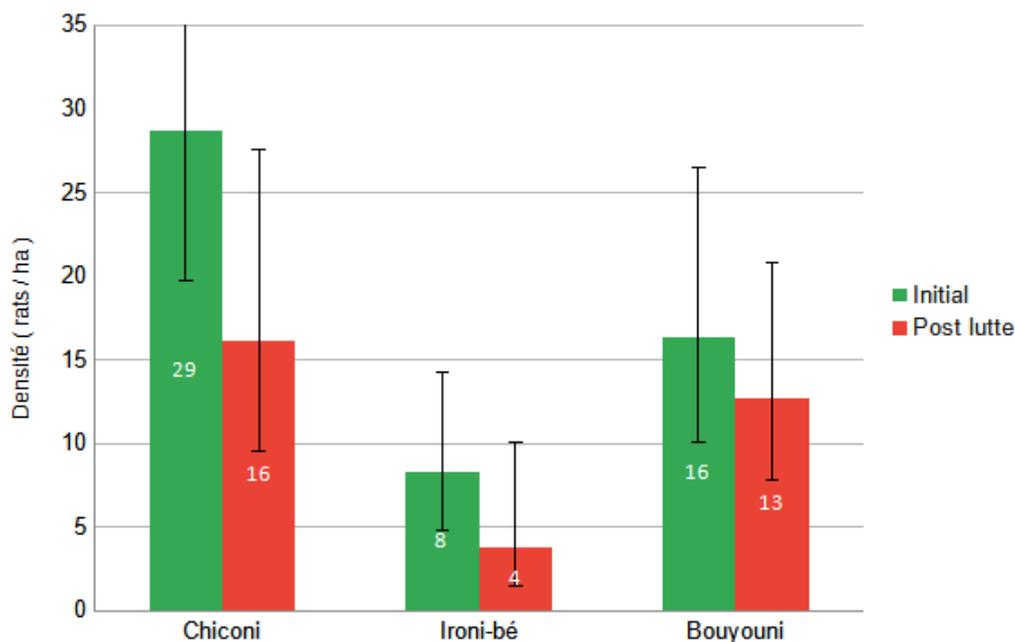


Figure 15 : Densité (rats/ha) sur les sites, estimée par CMR (package SECR sous R). Modèle retenu : g0~site, sigma~site (i.e probabilité de capture et domaine vital variant selon le site). Barres d'erreur : Intervalle de confiance à 95%. Comparé à l'état initial, une tendance à la diminution de la densité apparaît sur les trois sites avec la lutte, sans différence significative selon l'indice de chevauchement des barres d'erreur ainsi que l'ANCOVA (p= 0.051)

❖ Populations de rats via les chewcards

La proportion de CC consommée à l'état initial est significativement plus faible sur Bouyouni (49%) comparativement à Chiconi (85%) ($X^2 = 7.326$, p-value = 0.006796) et à Ironi-bé (80%) ($X^2 = 5.8134$, p-value = 0.0159).

Sur les trois sites, la majorité des sessions réalisées au cours de la lutte relève une proportion de CC consommée par le rat inférieure à 20% (Annexe 5). Ainsi, sur chaque site, les moyennes des proportions “ **avec lutte**” sont **significativement inférieures** à celles “ **sans lutte effective**” (Chiconi : $X^2 = 19.353$, p-value = 1.087e-05 ; Ironi-bé : $X^2 = 21.624$, p-value = 3.317e-06 ; Bouyouni : $X^2 = 8.2079$, p-value = 0.004171), jusqu'à des valeurs inférieures à 20% (Figure 16).

Suivi de l'indice du succès reproducteur du Crabier blanc

Les iSR varient entre les sites lors d'une même année, ainsi qu'au cours des années pour un même site, avec des amplitudes de variations interannuelles des iSR pouvant aller de 0.14 à 1.41 sur un même site (Figure 17 ; Annexe 6 et 7). Aucune tendance générale à la hausse ou à la baisse n'est observée au cours des années. La moyenne des iSR sans lutte, tous sites confondus, est de 0.73 (IC95% +/-0.16) juvéniles par couple.

Avec la lutte contre le rat l'iSR du CB semble **tripler sur Bouyouni** passant d'une moyenne de 0.64 sans lutte à 1.56 l'année avec lutte, soit une valeur supérieure à la distribution observée sans lutte depuis le début de l'activité de la héronnière en 2017. Au contraire, l'iSR semble **diminuer sur Ironi-bé** en passant d'une moyenne sans lutte de 1.03 à 0.44 l'année avec lutte, soit une valeur inférieure à la distribution observée sur ce site depuis 2014. Sur **Chiconi**, les iSR de la première année de lutte (0.10) et de la deuxième année de lutte (0.64) sont inférieurs à la moyenne de 0.67 en absence de lutte, mais ils s'inscrivent dans la distribution des iSR observés en absence de lutte sur le site depuis 2014 (Figure 17).

Malgré ces observations, les résultats de l'**ANCOVA** semblent indiquer qu'il n'y a **aucune interaction particulière** entre la variable **lutte et le succès reproducteur**, y compris lorsque l'effet des variables année et colonie (site) sont corrigés (ANCOVA : p = 0.941) (Annexe 8).

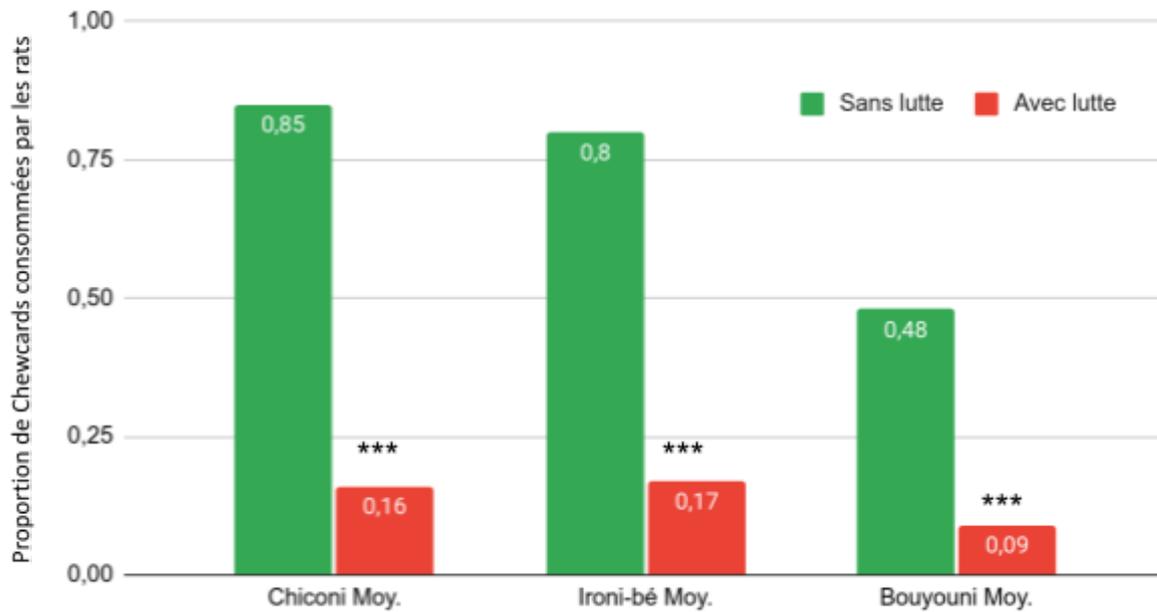


Figure 16 : Proportion moyenne de chewcards consommées par le rat sur les 1 ha de déploiement de chaque site. Sur chaque site, les moyennes des proportions “avec lutte” sont significativement inférieures à celles “sans lutte effective” et sont notées “***” (Chiconi : $X^2 = 19.353$, $p\text{-value} = 1.087e-05$; Ironi-bé : $X^2 = 21.624$, $p\text{-value} = 3.317e-06$; Bouyouni : $X^2 = 8.2079$, $p\text{-value} = 0.004$).

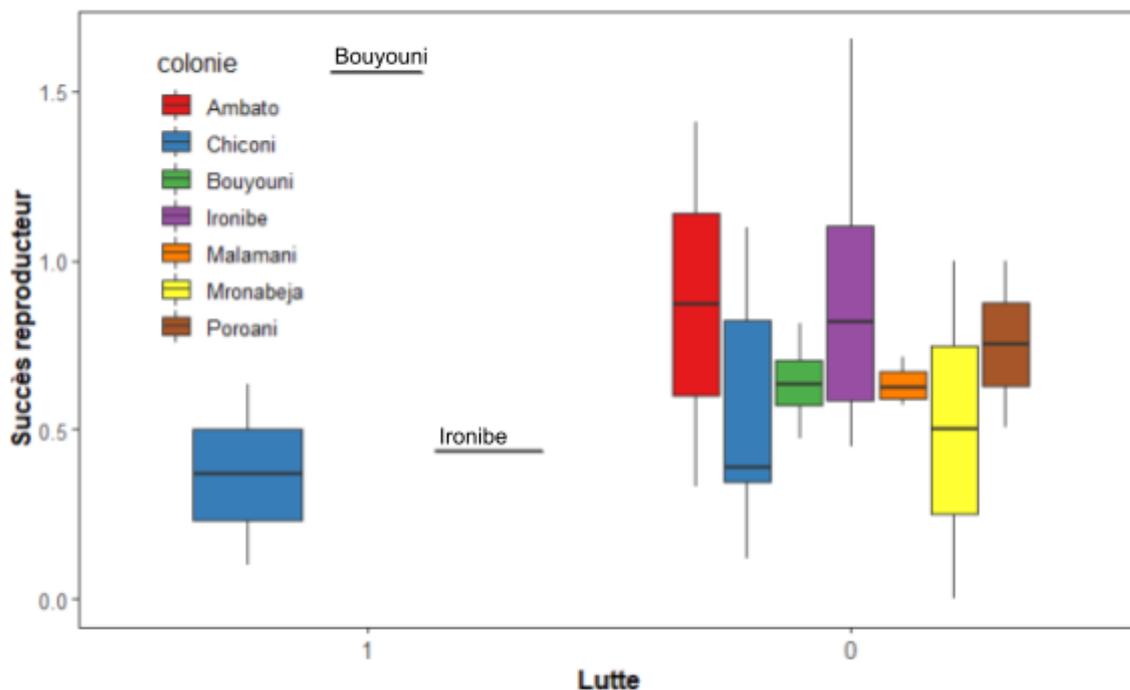


Figure 17 : Boxplot représentant la distribution des indices de succès reproducteur (iSR) du Crabier blanc sur les sites les années de lutte (1) et sans lutte contre le rat (0). LiSR de chaque site varie selon les années, avec une amplitude maximale observée de 1.41. Les iSR de Chiconi en période de lutte ne semblent pas bien différents de ceux observés sans lutte depuis 2014. L'iSR de Bouyouni en période de lutte semble notablement supérieur à ceux observés sans lutte depuis le début de l'activité de la héronnière en 2017. L'iSR en période de lutte sur Ironi-bé semble légèrement inférieur à ceux observés sans lutte depuis 2014 sur le site. Les bornes maximales et minimales d'une boxplot englobe 99.3% de la distribution des données.

Discussion

Populations de rats

❖ Densité de rats via CMR

Les données CMR ont permis de faire un **premier état de la densité de rats sur chacun des sites**. Les densités estimées à l'état initial sur Chiconi et Bouyouni (respectivement 29 et 16 rats/ha) **correspondent aux estimations de la densité en mangrove sur l'atoll d'Aldabra** aux Seychelles (*i.e* entre 20 et 42 rats/ha) (Harper et Bunbury, 2015). Seule la densité estimée sur Ironi-bé est plus faible (8 rats/ha) que celle observée sur Aldabra.

L'état initial a permis de constater que le site de **Chiconi possède une densité de rats significativement plus forte** (selon IC95%) que celle observée sur Ironi-bé. Le site de Bouyouni possède quant à lui une densité intermédiaire aux deux autres sites. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'hétérogénéité des sites. Les nombreuses habitations humaines à proximité du site de Chiconi apportent d'importantes quantités de déchets pouvant être une source de nourriture favorable à la prolifération des rats (Rocamora et Henriette, 2015). Sur Bouyouni la densité de palétuviers est plus importante que sur Ironi-bé ou Chiconi, or chaque branche et racine de palétuvier constitue une surface de déplacement "aérienne" qui vient s'ajouter à celle du sol. Ainsi, pour une même surface de mangrove au sol, il est supposé que la mangrove de Bouyouni avec une plus grande surface "aérienne" a une capacité d'accueil (abris et nourriture naturelle) supérieure aux deux autres sites. Mais ces hypothèses restent à vérifier.

Les moyens accordés à la lutte étant souvent limités, il est important de savoir quel **site traiter en priorité**. À enjeu égal (*i.e.* nombre équivalent de couples de CB sur les sites), il conviendrait d'intensifier la lutte sur le site avec la plus grande densité de rats, soit **Chiconi**. Afin de minimiser le nombre de rats, la lutte pourrait être **alliée à une diminution des déchets** humains (Rocamora et Henriette, 2015).

Les densités estimées en **saison humide et sèche** sur Ironi-bé en absence de lutte, ne sont **pas significativement différentes**. Ces premiers résultats sont en accord avec ce qui est observé en mangrove par Harper et al., (2015), et permettent une comparaison des densités pré-lutte (saison humide) et post lutte (saison sèche) **sans craindre un fort biais lié à la saisonnalité**. **Avec la lutte, la densité de rats tend à diminuer** sur les trois sites, mais de manière **non**

significative. Une diminution d'environ **50% de la densité** est estimée sur Chiconi et Ironi-bé, alors qu'elle est de seulement 18% sur Bouyouni. Cette différence peut en partie s'expliquer par un état initial sous-estimé sur Bouyouni. En effet, **neuf rats ont fui** avant d'être bagués lors de cette session CMR, ce qui a pour effet d'une part de **sous-estimer la densité** de rat initiale, et d'autre part d'augmenter la marge d'erreur (D. Ringler comm. pers.). De plus, l'aire de suivi (déploiement des cages) est quasi équivalente à l'aire de lutte (déploiement des A24) sur Bouyouni et Ironi-bé. Il est donc fort probable qu'il y ait un important **effet de bordure** sur ces derniers sites. En effet, des rats dont le domaine vital est voisin à l'aire de lutte peuvent régulièrement explorer cette aire (Ringler et al., 2014), notamment après la disparition de rats compétiteurs dans la zone (Hansen et al., 2020). Ces individus capturés viendraient ainsi **surestimer** le nombre de rats ayant réellement leur domaine vital dans la zone en post lutte. De plus, l'estimation de **l'état post lutte sur Chiconi a été réalisée un mois après l'arrêt** de la lutte, il intègre donc probablement certains rats ayant recolonisé le site quelques jours, voire semaines après l'arrêt de la lutte. Compte tenu de ces biais, la **différence de densité réelle des trois sites est supposée plus forte que celle estimée.**

À l'avenir, ces biais devraient être réduits. Pour **pallier l'effet de bordure** et avoir des résultats plus représentatifs de la réalité, il serait nécessaire d'**avoir une distance entre l'aire de suivi et la frontière extérieure de l'aire de lutte d'à minima une, voire deux fois le domaine vital (HR95) du rat sur le site** (D. Ringler comm. pers.).

Malgré cette tendance de densité de rats à la baisse, les estimations **sur les trois sites après lutte restent supérieures à 1 rat/ha**, soit le seuil de **recommandation en conservation pour les oiseaux** (D. Ringler comm. pers.).

❖ **Comparaison avec les autres méthodes de suivi**

➤ **Chewcards (CC)**

La proportion de CC consommée par les rats **diminue avec la lutte de manière significative sur les trois sites.** La diminution de cet indice est plus importante que celle de la densité estimée par CMR : la proportion de CC diminue de 69%, 63% et 39% sur Chiconi, Ironi-bé et Bouyouni respectivement vs. une diminution de 45%, 50% et 18% pour la densité respectivement. Ces résultats réaffirment ceux observés par la CMR, soit une diminution de la densité ou à minima de l'activité des rats avec la lutte. Sur chaque site, **l'indice d'activité des rats passe sous le seuil des 20%** pendant la quasi-totalité de la lutte (en moyenne sur Chiconi : 16%, Ironi-bé 17% et Bouyouni 9%). Selon Ruffell et al., (2015) l'indice d'activité des CC

peut être comparé à celui des tunnels à empreinte, qui est largement utilisé pour le suivi d'abondance relative des rats en Nouvelle-Zélande (Duron et al., 2017). Ainsi, on peut conclure que les présents résultats sont **équivalents à ceux de l'étude sur l'efficacité des A24 en forêt hawaïenne** qui montre un maintien sous le seuil des 20% d'activité pendant 18 mois (Bogardus, 2020).

Néanmoins, dans cette étude l'indice de CC **ne semble pas relever la différence de densité estimée via CMR entre les sites**. En effet, à l'état initial, cet indice est équivalent sur Chiconi (85%) et Ironi-bé (80%), alors que ce dernier site possède une densité de rats estimée par CMR significativement plus faible que sur Chiconi. Au contraire, le site de Bouyouni affiche lui une consommation de CC bien plus faible (seulement 48%) que celle sur Ironi-bé. Il faut donc rester prudent quant à l'emploi de cet indice de consommation pour estimer des abondances/densité relatives. Malgré un coût de suivi par CC 30 fois moindre que celui par cage (Sweetapple, 2011), un **remplacement du suivi CMR par celui avec des CC paraît non pertinent si l'objectif est d'étudier la relation entre une densité de rats et le SR du Crabier blanc**.

Il a par ailleurs été démontré que la corrélation entre les indices d'abondance relative des rongeurs provenant de différents dispositifs est influencée par divers facteurs dont la densité et le comportement des populations (Blackwell et al. 2002; Nathan et al. 2013). Sous condition de moyens, il serait intéressant de **continuer le suivi CC** en parallèle de la CMR afin d'estimer la **relation entre ces deux indicateurs** via un GLM, comme utilisé pour comparer des fréquences de CC avec celle de waxtags⁵ ou de boulettes fécales (Sweetapple et al., 2011) ou encore des tunnels à empreintes (Ruffel et al., 2015). Actuellement le GEPOMAY dispose de 5 sessions de CMR et CC réalisées sur une même aire d'étude au même moment (1 jour d'intervalle) et **10 sessions sont à minima** nécessaires pour cette analyse de corrélation (Burnham et Anderson 2002).

➤ A24

Le nombre de déclenchements des A24 est intéressant car il permet d'avoir un suivi direct de l'impact des pièges en fournissant une **approximation du nombre de rats tués** sur le site (Gronwald et Russell, 2021). En outre, cet outil n'occasionne **quasiment aucun coût** supplémentaire à celui de la lutte : les compteurs électroniques sont compris dans le prix d'achat des A24 et la relève mensuelle du nombre de déclenchements est comprise dans le temps salarié consacré à la maintenance des pièges. Aussi, le nombre de déclenchements des

⁵ Boulette d'appât au beurre de cacahuète semi-rigide témoignant des traces de dents de ses consommateurs

A24 a **déjà été utilisé comme première approximation de la densité des rats**, notamment pour comparer deux sites entre eux (Ogden et al., 2018).

Dans la présente étude, le nombre de déclenchements journalier par A24 varie de 0.13 à 0.02, ce qui est supérieur à 0.01 du même indice observé en forêt néo-zélandaise (Ogden et al., 2018).

Les analyses révèlent une **différence significative du nombre de déclenchements moyen en fonction des sites**. Bouyouni affiche le plus grand nombre, suivi par Ironi-bé et enfin Chiconi. Avec une différence significative uniquement entre Bouyouni et Chiconi. Cet indice pourrait porter à croire que la densité de rat est plus importante sur Bouyouni que sur Chiconi, ce qui ne semble pas ressortir des estimations via CMR.

Néanmoins, **compte tenu de l'hétérogénéité des protocoles de lutte** sur les sites (espacement des A24 de 50 m sur Chiconi contre 10-30 m sur Ironi-bé et Bouyouni), **ces différences ne peuvent être interprétées comme une différence de densité ou d'activité des rats entre les sites**.

Cet **indicateur ne permet pas non plus d'observer la diminution de densité** et d'activité des rats qui semblent pourtant apparaître avec la lutte selon les données de CC et CMR. En effet, il était attendu un pic de déclenchement en début de lutte, puis une diminution forte marquant la diminution du nombre de rats sur le site. Or, outre une légère tendance à la diminution des déclenchements sur Chiconi après 12 mois de lutte, les analyses ne montrent aucune variation significative de cet indicateur au cours du temps sur Ironi-bé et Bouyouni. Il ne paraît donc pas pertinent d'utiliser cet indicateur pour suivre l'effet de la lutte sur le rat.

Toutefois, les déclenchements A24 restent intéressants à suivre car ils informent sur le nombre de rats potentiellement tués et sur la recolonisation des sites. Avec plus de 300 rats potentiellement éliminés sur chacun des sites, soit un chiffre nettement supérieur aux estimations de densité initiale estimée par CMR, ainsi qu'une moyenne mensuelle de déclenchements constante, il peut être affirmé que la **recolonisation est continue sur les sites**.

Succès reproducteur du Crabier blanc

L'iSR en absence de lutte contre le rat varie de 0 à maximum 1.65 juvéniles par couple, avec une moyenne tout site et toute année en absence de lutte confondue de 0.73 (IC95% +/-0.16). Ce qui est inférieur aux 2.05 mesuré chez cette espèce à Madagascar (Privot et al., 2020).

L'ANCOVA n'indique **aucun effet significatif de la lutte sur l'iSR du CB**. Malgré l'effet dévastateur du rat sur d'autres espèces d'ardéidés en mangrove du golf persique (Neinavaz et al., 2013 ; Etezadifar et al., 2010), il reste **possible que le rat ne consomme pas les CB**. Une analyse de **l'ADNe stomacale de rat**, prélevé au moment du pic de ponte du CB (octobre-novembre), devrait être prochainement réalisée en partenariat avec Emmanuel Corse du CUFR de Mayotte et permettra d'attester d'une consommation du CB par le rat. **Si cette consommation existe**, il est aussi possible que le **rat ait un impact très faible sur l'iSR du CB**, comme c'est le cas pour d'autres espèces d'ardéidés dont l'iSR est principalement affecté par la météo, l'accès aux sources de nourriture, l'importance de la colonie et le degré d'artificialité des habitats (Hafner, 1978; Tourenq et al., 2001).

Toutefois, il est intéressant de noter que comparativement à la moyenne sans lutte, **l'iSR triple sur Bouyouni l'année de lutte**, soit une augmentation largement au-dessus des variations moyennes. Selon les estimations, ce site est celui où la densité de rats a le moins diminué avec la lutte. Si le rat a bien un effet sur le CB, il est donc attendu que l'iSR augmente encore davantage sur les deux autres sites où la densité de rats semble avoir davantage diminué. Au contraire, les iSR sur **Chiconi et Ironi-bé restent quasi équivalents** à ceux observés depuis 2014 sur ces sites. Mais ces résultats pourraient en partie s'expliquer par des missions de capture de CB pour un suivi télémétrique, organisée sur les sites d'Ironi-bé et Chiconi de 2019 à 2021. Ce facteur de **dérangement aurait pu affecter négativement l'iSR** des populations de ces sites. Afin de pouvoir conclure à un réel effet, le suivi du CB devrait continuer ces prochaines années en limitant le dérangement de ces populations.

L'iSR devrait aussi être estimé de manière plus robuste qu'un simple quotient : nombre maximum de nids observés / nombre maximum de juvéniles observés sur la saison. Cet indice simpliste est notamment **biaisé par le comptage de juvéniles des années passées**, qui restent, ou reviennent, sur leur site de naissance. Le nombre de juvéniles à n+2, 3 ans après la lutte pourrait éventuellement traduire l'effet de cette lutte. Cependant, le GEPOMAY tente de réaliser un suivi ambitieux par **CMR**, basé sur une identification **par photocomptage des nids et du nombre de juvéniles maximum présents dans chaque nid** (équivalent d'un marquage individuel). Celui-ci devrait aboutir d'ici l'été 2023.

En parallèle du suivi du CB, le **suivi des populations de rats sur les sites devrait lui aussi continuer** afin de fournir un jeu de données plus conséquent permettant d'**identifier la relation entre rats et CB**. Ceci permettra de déterminer avec plus de précision des objectifs (chiffrés) en termes de lutte contre le rat dans des objectifs de préservation du CB (Norbury et al., 2015). Une durée de suivi de **4 ans** est la moyenne de nombreuses études de lutte contre le

rat (Duron et al., 2017). Des études de cette durée ont permis à plusieurs équipes de conclure à l'effet de la lutte sur des espèces comme des passereaux dans la Réserve naturelle d'Iroise (Yésou et al., 2013), voire de faire des préconisations chiffrées d'une densité de rat (< 3 rats/ha) pour favoriser une espèce d'orthoptère, le weta d'Auckland (*Hemideina thoracica*) en Nouvelle-Zélande (Ruscoe et al., 2013).

Optimisation de la lutte

Chaque espèce, voire chaque population, peut réagir différemment face à une même menace, selon sa biologie et ou ses comportements (Norbury et al., 2015). Il est possible que l'effet du rat sur le SR du CB ne suivent pas une courbe linéaire, mais davantage une courbe proche du modèle dit "modérément résistant" (Figure 18). Ainsi, une **diminution sous un seuil "c"** **peut être nécessaire pour noter l'effet du rat sur le CB**. Une intensification de la lutte serait donc nécessaire pour l'observer.

Dans cet objectif, il peut être envisagé de **rapprocher les pièges A24**. Mais l'effet peut rester limité. Une précédente étude de Gilbert et al., (2018) montre en effet que l'activité des rats sur un site passe de 32% à 25% avec un espacement des A24 initial de 50 m, passé à 25 m. Dans la présente étude, le protocole mis en place ne permet pas de tirer une quelconque conclusion sur l'effet de l'espacement des A24. En effet, seulement trois sites sont suivis pour le rat sur une ou deux années maximum, et aucun site n'est comparable aux autres (différence de la densité de rats à l'état initial ; différences de domaines vitaux des rats ; effet de bordure qui biaise les estimations). Toutefois, **l'espacement des A24 sur Chiconi (50 m) semble supérieur au cœur du domaine vital** estimé sur ce site (*i.e.* 27 m). La densité des rats sur Chiconi restant importante après lutte (16 rats/ha), il paraît donc **pertinent de réduire l'espacement entre les pièges (30 m maximum)** afin que chaque rat de ce site ait un piège à disposition. Une **comparaison de l'effet de la lutte sur ce site avec espacement 50 m vs. 30 m** pourrait aussi **renseigner sur l'effet de ce facteur d'espacement**. Si un rapprochement des A24 s'avère efficace pour diminuer la densité de rats, un second rapprochement sur l'ensemble des sites paraît difficile. En effet, cette action induit une réduction de l'aire de lutte (qui au contraire, devrait être élargie afin de limiter l'effet de bordure) ou nécessite une augmentation du nombre de pièges et donc de l'investissement (achat, maintenance).

Si malgré une optimisation de l'espacement, la lutte avec A24 ne permet pas de réduire de manière efficiente la densité de rats (*i.e.* sous un seuil cible avec un coût économique limité), une **lutte chimique** avec des produits faiblement bio-accumulants pourrait être

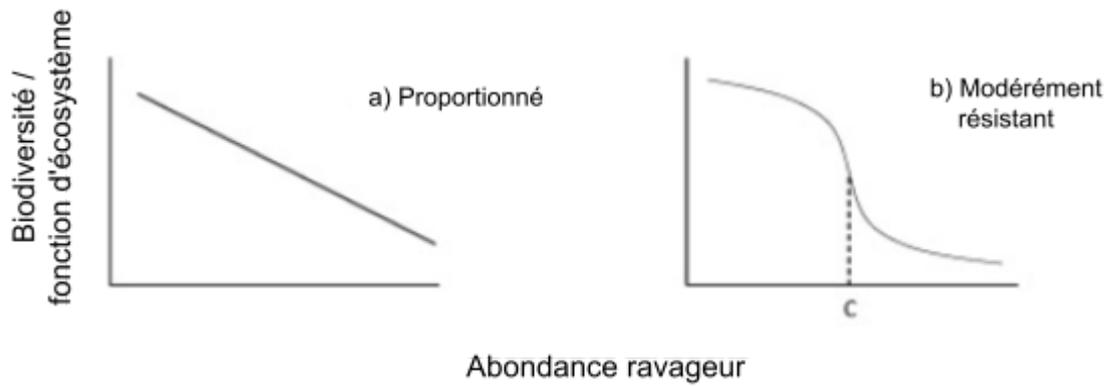


Figure 18 : Deux relations théoriques simples entre l'abondance des ravageurs et une variable de réponse de conservation (e.g. ex., richesse, abondance, fécondité, survie, pollinisation). Les effets d'une lutte contre les ravageurs peut parfois nécessiter le passage sous un seuil "c" avant d'être visibles. (Norbury et al., 2015)

envisagée ponctuellement. Pour exemple, 2 applications à 7 jours d'intervalle de 16 kg/ ha de Brodifacoum a permis d'éradiquer entre 65 et 150 rats en forêt sur l'île tropicale Tetiaroa (Samaniego et al., 2020) et se révèle aussi efficace en mangrove (Ringler et al., 2021). Afin de limiter la consommation et donc l'empoisonnement d'autres espèces comme les crabes, les appâts pourraient être déployés dans la canopée sous forme de "bolas" comme proposé par Harper et al., (2015). Une méta-analyse de 136 études de lutte contre le rat montrent qu'en moyenne, le coût à l'hectare des luttés par piégeage, par piégeage et poison ou par poison seulement sont équivalents (Duron et al., 2017).

Les autres moyens de lutte ne paraissent pas pertinents dans l'immédiat. La lutte biologique, avec l'exemple de l'introduction du chat sur les îles Kerguelen ou de la chouette effraie à Hawaï, montrent un manque d'efficacité sur l'espèce cible et un impact négatif sur des espèces non-cibles (Chapuis et al., 1994, Rocamora et Henriette, 2015). D'autres méthodes comme des virus-contraceptifs ou des individus génétiquement modifiés, rendant la population stérile, sont prometteuses, mais elles suscitent des craintes concernant le manque de contrôle des vecteurs et les effets indésirables d'altérations génétiques (Campbell et al., 2015).

Conclusion

La lutte avec A24, comme elle a été déployée dans les mangroves mahoraises, tend à diminuer la densité de rats. Sur deux des trois sites, la densité baisse de moitié, et la diminution est probablement sous-estimée sur les trois sites. Néanmoins, aucun effet particulier de la lutte contre le rat sur l'iSR du CB n'est apparu. Il est possible que le rat n'ait aucun effet significatif sur le Crabier blanc. Toutefois, le jeu de données semble encore trop faible et le protocole de lutte et de suivi comprend plusieurs biais, empêchant de conclure à une quelconque relation rat-CB. Le suivi simultané de la densité de rat et du succès reproducteur du crabier devrait se poursuivre, pour un total de suivi d'à minima quatre ans. Ceci afin d'identifier plus clairement cette relation et de proposer un seuil chiffré de la densité de rats à maintenir pour maintenir voire augmenter la population de CB selon les objectifs.

Le nombre de déclenchements A24 ne paraît pas être corrélé à la densité de rats sur les sites et ne peut donc être utilisé pour estimer ce paramètre. L'indice des chewcards montre, quant à lui, une diminution de l'abondance relative encore plus marquée que la diminution de densité estimée par CMR, mais sa corrélation avec la densité estimée est contrastée. Ainsi, comme pour le suivi du succès reproducteur du CB, il est recommandé de réaliser un suivi robuste

basé sur de la CMR pour le suivi rat. Ces suivis étant coûteux, l'appel à des bénévoles, très utilisé pour la lutte contre le rat en Nouvelle-Zélande, peut être une solution efficace pour réduire les coûts tout en sensibilisant les citoyens à l'environnement (Duron et al., 2017).

Cette étude a permis de mettre en lumière l'effet des A24 sur les rats en mangroves, ainsi que des biais de protocole et des propositions d'amélioration de lutte (rapprochement A24, lutte chimique). Elle rend aussi compte des premières données qui contribueront à évaluer la relation entre les méthodes de suivi du rat (déclenchements A24, CC et CMR). Néanmoins, l'effet de la lutte sur d'autres espèces indigène n'a pas été traité. En plus des espèces d'oiseaux, les 735 ha de mangroves mahoraises présentent 7 espèces de palétuviers, plusieurs espèces de mollusques, 5 espèces de reptiles, 17 espèces de crabes, plus d'une cinquantaine d'espèces de poissons (UICN France, 2017). L'effet néfaste du rat est connu sur de très nombreuses espèces d'oiseaux, de reptiles, de mammifères ou plus ou moins indirectement de plantes (Doherty et al., 2016). L'équipe de Pender et al., (2013) a notamment pu montrer qu'une activité de rat maintenue sous le seuil des 20% suffit à augmenter la production de graines d'une espèce de plantes menacées en forêts mésiques hawaïennes. De la même manière, l'effet de la lutte avec A24 sur d'autres espèces que le Crabier blanc est envisagée et notamment sur les crabes (Rocamora et Henriette, 2015), qui sont des ingénieurs des mangroves (Kristensen, 2008). De manière empirique le GEPOMAY a noté une augmentation de la densité de crabes avec la lutte. Cet effet devrait être vérifié par des suivis de population de crabes via caméra trap par exemple.

Bibliographie et webographie

- Atkinson, I. (1985). The spread of commensal species of *Rattus* to oceanic islands and their effects on island avifaunas. *ICPB Tech Publ*, 3, 35-81.
- Besançon, L., & Dragicevic, P. (2017). La Différence Significative entre Valeurs p et Intervalles de Confiance. 11.
- Blackwell GL, Potter MA, McLennan JA. (2000). Rodent density indices from tracking tunnels, snap-traps and Fenn traps: do they tell the same story? *New Zealand Journal of Ecology* 26, 43–51.
- Bogardus, T., & Shiels, A. B. (2020). Effectiveness of A24 automatic traps for landscape level rodent control. In *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference* 29, 29.
- Borchers, D. L., & Efford, M. G. (2008). Spatially explicit maximum likelihood methods for capture–recapture studies. *Biometrics*, 64, 377–385.
- Brouat, C., Tollenaere, C., Estoup, A., Loiseau, A., Sommer, S., Soanandrasana, R., ... & Duplantier, J. M. (2014). Invasion genetics of a human commensal rodent: the black rat *Rattus rattus* in Madagascar. *Molecular ecology*, 23(16), 4153-4167.
- Burnham KP., Anderson DR. (2002). *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach* (2nd edn). Springer, New York.
- Carter, A., & Peters, D. (2016). Self-Resetting Traps Provide Sustained, Landscape-Scale Control of a Rat Plague in New Zealand. *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference*, 27(27).
- Campbell, K. J., Beek, J., Eason, C. T., Glen, A. S., Godwin, J., Gould, F., ... & Baxter, G. S. (2015). The next generation of rodent eradications: innovative technologies and tools to improve species specificity and increase their feasibility on islands. *Biological Conservation*, 185, 47-58.
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human–induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science advances*, 1(5).
- Chapuis, J. L., Boussès, P., & Barnaud, G. (1994). Alien mammals, impact and management in the French subantarctic islands. *Biological Conservation*, 67(2), 97-104.
- Doherty, T. S., Glen, A. S., Nimmo, D. G., Ritchie, E. G., & Dickman, C. R. (2016). Invasive predators and global biodiversity loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(40), 11261-11265.
- Dorst, J. (1963). *L'introduction d'especes animales et leur impact sur l'environnement tropical*.

- The Ecology of Man in the Tropical Environment L'Ecologie de l'homme dans le milieu tropical, 245.
- Dueñas, M.-A., Hemming, D. J., Roberts, A., & Diaz-Soltero, H. (2021). The threat of invasive species to IUCN-listed critically endangered species : A systematic review. *Global Ecology and Conservation*, 26.
- Duron, Q., Shiels, A. B., & Vidal, E. (2017). Control of invasive rats on islands and priorities for future action. *Conservation Biology*, 31(4), 761-771.
- Efford, M. G., Borchers, D. L., & Byrom, A. E. (2009). Density Estimation by Spatially Explicit Capture--Recapture: Likelihood-Based Methods. In D. L. Thomson, E. G. Cooch, & M. J. Conroy (Eds.), *Modeling Demographic Processes In Marked Populations*, 255-269.
- Esnault Q. (2020). Révision du protocole d'étude et photo-comptage des colonies de Crabiers blancs (*Ardeola idae*) à Mayotte dans le cadre du Life BIODIV'OM. Rapport de stage, Groupe d'étude et de protection des oiseaux de Mayotte. 36.
- Etezadifar, F., Barati, A., Karami, M., Danekar, A., & Khaleghizadeh, A. (2010). Breeding Success of Western Reef Heron in Hara Biosphere Reserve, Persian Gulf. *Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology*, 33(4), 527-533.
- Gardner, M. J., & Altman, D. G. (1986). Confidence intervals rather than P values : Estimation rather than hypothesis testing. *Br Med J (Clin Res Ed)*, 292(6522), 746-750.
- GEPOMAY (2020 a). Plan opérationnel de lutte contre le Rat noir en mangrove sur les sites de nidification du Crabier blanc. Rapport interne.
- GEPOMAY (2020 b). Rapport de la mission de contrôle des rats dans la mangrove de Chiconi/Mangajou d'octobre 2019 à octobre 2020. Rapport interne.
- GEPOMAY (2020 c). Premier rapport de l'évaluation de l'impact des Espèces Exotiques Envahissantes sur *Ardeola idae*. Rapport interne.
- Gilbert J., (2018). Windy Hill Sanctuary Goodnature A24 Trap Project. Technical report No.10. Windy Hill, New Zealand, 9.
- Gillies, C., Gorman, N., Crossan, I., Harawira, R., Hawaikirangi, R., Long, J., & McCool, E. (2012). A second progress report on DOC S&C Investigation 4276 'Operational scale trials of self-resetting traps for ground based pest control for conservation in NZ forests'. Department of Conservation Science Report, Department of Conservation, Hamilton, New Zealand, 50.
- Gronwald, M., & Russell, J. C. (2021). Measuring rat relative abundance using camera traps

- and digital strike counters for Goodnature A24 self-resetting traps. *New Zealand Journal of Ecology*, 45(1), 1-7.
- Hafner, H. (1978). Le succès de reproduction de quatre espèces d'Ardeidés *Egretta g. garzetta* L., *Ardeola r. ralloides* Scop., *Ardeola i. ibis* L., *Nycticorax n. nycticorax* L. en Camargue. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, (2), 279-289.
- Hansen, N., Hughes, N. K., Byrom, A. E., & Banks, P. B. (2020). Population recovery of alien black rats *Rattus rattus*: A test of reinvasion theory. *Austral ecology*, 45(3), 291-304.
- Harper, G. A., van Dinther, M., Russell, J. C., & Bunbury, N. (2015). The response of black rats (*Rattus rattus*) to evergreen and seasonally arid habitats: informing eradication planning on a tropical island. *Biological Conservation*, 185, 66-74.
- Harper, G. A., & Bunbury, N. (2015). Invasive rats on tropical islands : Their population biology and impacts on native species. *Global Ecology and Conservation*, 3, 607-627.
- Harris, D. B., & Macdonald, D. W. (2007). Interference Competition Between Introduced Black Rats and Endemic Galápagos Rice Rats. *Ecology*, 88(9), 2330-2344.
- Holmes, N. D., Griffiths, R., Pott, M., Alifano, A., Will, D., Wegmann, A. S., & Russell, J. C. (2015). Factors associated with rodent eradication failure. *Biological Conservation*, 185, 8-16.
- Howald, G., Donlan, C. J., Galván, J. P., Russell, J. C., Parkes, J., Samaniego, A., ... & Tershy, B. (2007). Invasive rodent eradication on islands. *Conservation biology*, 21(5), 1258-1268.
- Jeanne, F., Dautrey, E., Oussenimallah, B., Crémades, C., Pusineri, C., & Lizot, P. (2018). Plan national d'actions en faveur du Crabier blanc (*Ardeola idae*) sur l'île de Mayotte (2019–2023). Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Mayotte. GEPOMAY.
- Kristensen, E. (2008). Mangrove crabs as ecosystem engineers; with emphasis on sediment processes. *Journal of sea Research*, 59(1-2), 30-43.
- Le Corre, M., Danckwerts, D.K., Ringler, D., Bastien, M., Orłowski, S., Morey Rubio, C., Pinaud, D., Micol, T., (2015). Seabird recovery and vegetation dynamics after Norway rat eradication at Tromelin Island, western Indian Ocean. *Biol. Conserv.* 185, 85–94.
- Micol, T., & Jouventin, P. (2002). Eradication of rats and rabbits from Saint-Paul Island, French Southern territories. *Turning the tide: the eradication of invasive species*, 199-205.
- Moors, P. J., Atkinson, I. A. E., & Sherley, G. H. (1992). Reducing the rat threat to island birds. *Bird Conservation International*, 2(2), 93-114.

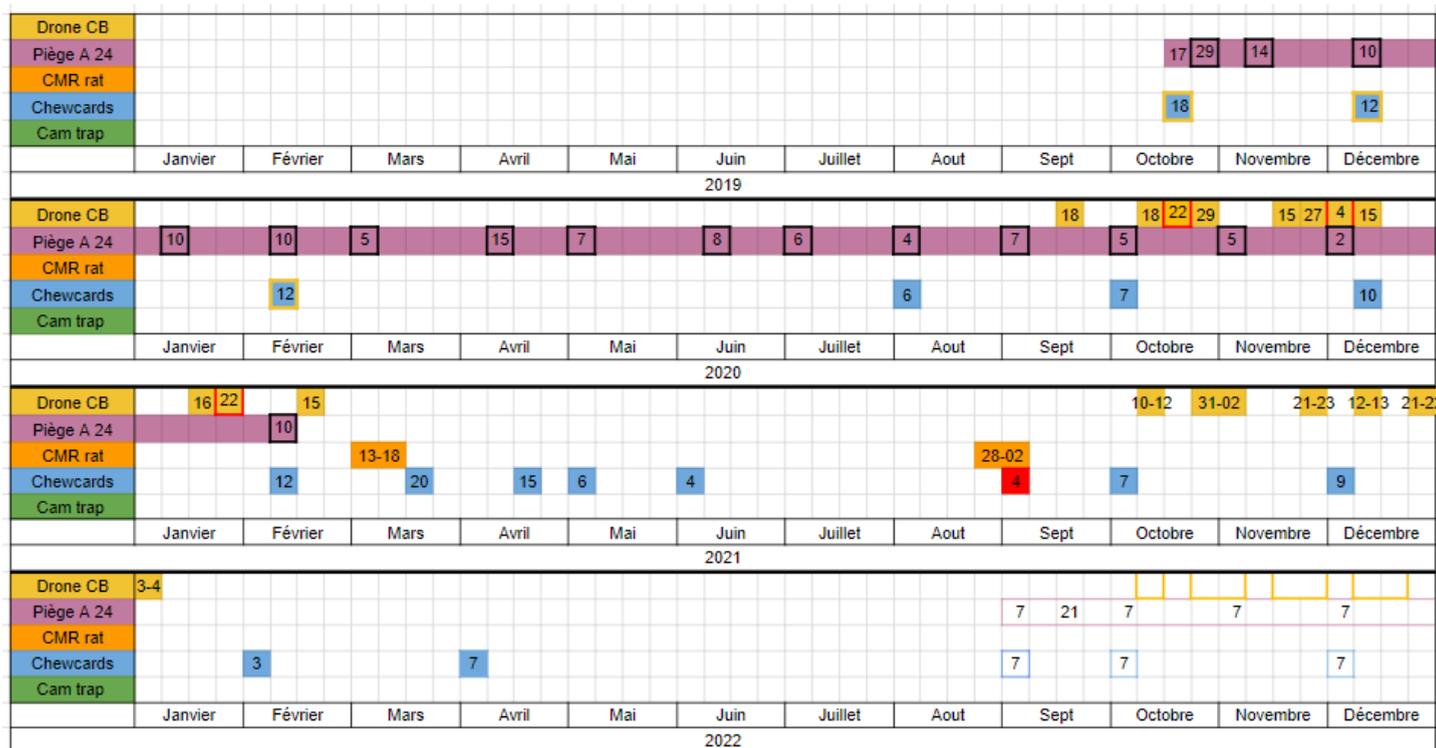
- Musser G.M. & Carleton M.D. (2005). Family Muridae. In: Mammal species of the world: a taxonomic and geographic reference, (Wilson D.E. & Reeder D.M., eds.). The John Hopkins University Press, Baltimore. 894-1531.
- Nathan, H. W., Clout, M. N., Murphy, E. C., & MacKay, J. W. (2013). Strategies for detection of house mice on a recently invaded island. *New Zealand Journal of Ecology*, 26-32.
- Naughton D. (2016). *Histoire naturelle des mammifères du Canada*. Waterloo, Québec : Éditions Michel Quintin.
- Neinavaz, E., Barati, A., Brown, J. L., Etezadifar, F., & Emami, B. (2013). Effects of nest characteristics and black rat *Rattus rattus* predation on daily survival rates of great egret *Ardea alba* nests in mangrove forest in the Hara Biosphere Reserve, the Persian Gulf. *Wildlife Biology*, 19(3), 240-247.
- Ng, M., Tram, E., & Aubin, L. (2016). Environmental Factors Associated with Increased Rat Populations : A Focused Practice Question. 30.
- Norbury, G. L., Pech, R. P., Byrom, A. E., & Innes, J. (2015). Density-impact functions for terrestrial vertebrate pests and indigenous biota: guidelines for conservation managers. *Biological Conservation*, 191, 409-420.
- Ogden, J. (2018). Report on rat trapping and performance of A24 multi-kill traps on hirakimata over two years. 28.
- Pender, R. J., Shiels, A. B., Bialic-Murphy, L., & Mosher, S. M. (2013). Large-scale rodent control reduces pre-and post-dispersal seed predation of the endangered Hawaiian lobeliad, *Cyanea superba* subsp. *superba* (Campanulaceae). *Biological Invasions*, 15(1), 213-223.
- Privot, Y. Z., de Roland, L.-A. R., Rakotondratsima, M., Razafindrakoto, Y., Razafindrajao, F., Rabarisoa, R., & Thorstrom, R. (2020). Breeding ecology and nestling growth of the Madagascar Pond Heron *Ardeola idae* in a monospecific colony at Sofia Lake, northern Madagascar. *Ostrich*, 91(4), 313-325.
- Ringler, D., Russell, J., Jaeger, A., Pinet, P., Bastien, M., & Le Corre, M. (2014). Invasive rat space use on tropical islands: Implications for bait broadcast. *Basic and Applied Ecology*, 15(2), 179-186.
- Ringler, D., Guillerault, N., Baumann, M., Cagnato, M., & Russell, J. C. (2021). Rodenticide baiting black rats (*Rattus rattus*) in mangrove habitats. *Wildlife Research*, 48(6), 554.
- Rocamora, G., & Henriette, E. (2015). *Invasive Alien Species in Seychelles*. Scientific Publications of the Muséum national d'Histoire naturelle, Paris.
- Rocamora, G., & Said, S. (2005). Éradication complète des rats sur les trois îlots d'Hajangoua

- (Mayotte). DAF de Mayotte.
- Ruffell, J., Innes, J., & Didham, R. (2015). Efficacy of chew-track-card indices of rat and possum abundance across widely varying pest densities. *New Zealand Journal of Ecology*, 39.
- Ruscoe, W. A., Sweetapple, P. J., Perry, M., & Duncan, R. P. (2013). Effects of spatially extensive control of invasive rats on abundance of native invertebrates in mainland New Zealand forests. *Conservation Biology*, 27(1), 74-82.
- Russell, J. C., Gleeson, D. M., & Le Corre, M. (2011). The origin of *Rattus rattus* on the Îles Éparses, Western Indian Ocean. *Journal of Biogeography*, 38(9), 1834-1836.
- Samaniego, A., Griffiths, R., Gronwald, M., Holmes, N. D., Oppel, S., Stevenson, B. C., & Russell, J. C. (2020). Risks posed by rat reproduction and diet to eradications on tropical islands. *Biological Invasions*, 22(4), 1365-1378.
- Shiels, A. B., Bogardus, T., Rohrer, J., & Kawelo, K. (2019). Effectiveness of snap and A24-automated traps and broadcast anticoagulant bait in suppressing commensal rodents in Hawaii. 13.
- Sweetapple, P., & Nugent, G. (2011). Chew-track-cards : A multiple-species small mammal detection device. *New Zealand Journal of Ecology*, 35, 153.
- Tourenq, C., Barbraud, C., Sadoul, N., Sandoz, A., Lombardini, K., Kayser, Y., & Martin, J. L. (2001). Does foraging habitat quality affect reproductive performance in the little Egret (*Egretta garzetta*)?. *Animal Biodiversity and Conservation*, 24, 1-10.
- UICN France (2017). La Liste rouge des écosystèmes en France - Chapitre Mangroves de Mayotte, Paris, France, 72.
- Vadier, A. (2021). Rythme d'activité journalier des Crabiers blancs (*Ardeola Idae*) et détectabilité des nids sur les colonies de reproduction à Mayotte: quelles préconisations pour un suivi à long terme?. *Mémoire de stage–Almodis Vadier*, 3. 36.
- Wilson, D. J., Efford, M. G., Brown, S. J., Williamson, J. F., & McElrea, G. J. (2007). Estimating density of ship rats in New Zealand forests by capture-mark-recapture trapping. *New Zealand Journal of Ecology*, 31(1), 47-59.
- Wyatt, K. B., Campos, P. F., Gilbert, M. T. P., Kolokotronis, S.-O., Hynes, W. H., DeSalle, R., Daszak, P., MacPhee, R. D. E., & Greenwood, A. D. (2008). Historical Mammal Extinction on Christmas Island (Indian Ocean) Correlates with Introduced Infectious Disease. *PLOS ONE*, 3(11).
- Yang, T., Zhao, Q., Wang, X., & Zhou, Q. (2018). Sub-pixel chessboard corner localization for camera calibration and pose estimation. *Applied Sciences*, 8(11), 2118.

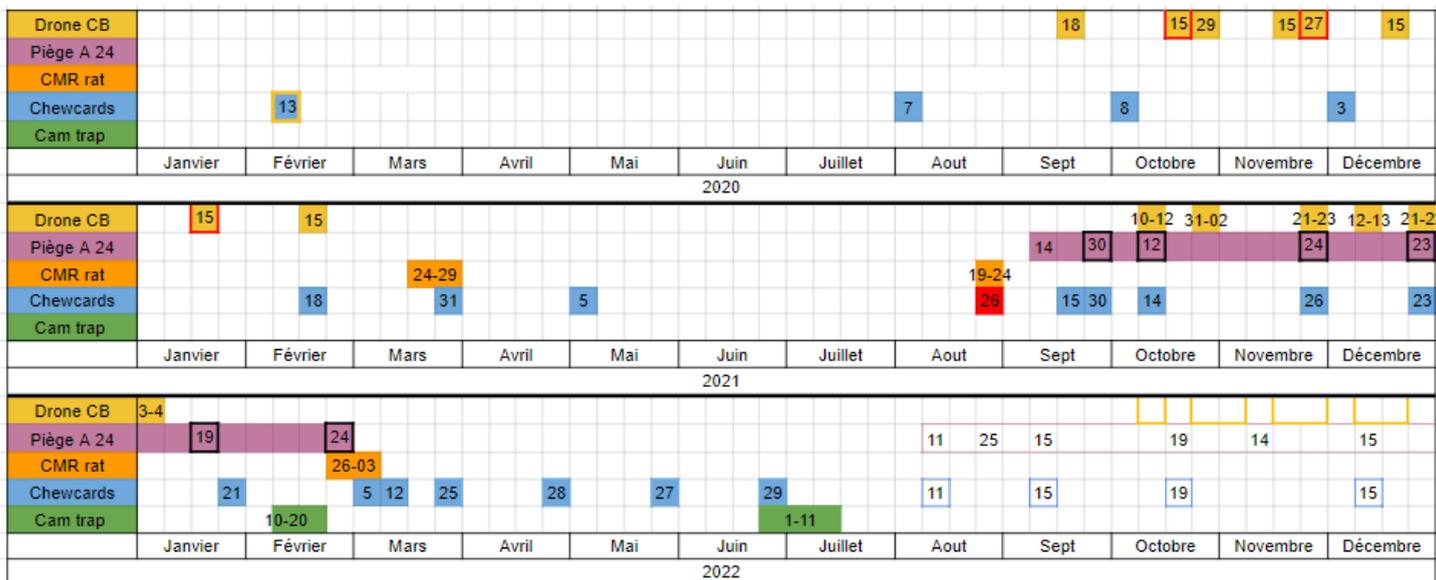
Yésou, P., Lorvelec, O., Bernard, F., Claise, M., & Le Cras, A. (2013). L'éradication des rats sur de petites îles au profit de la biodiversité. *Faune Sauvage*, 301, 18-21.

Annexes

a)



b)



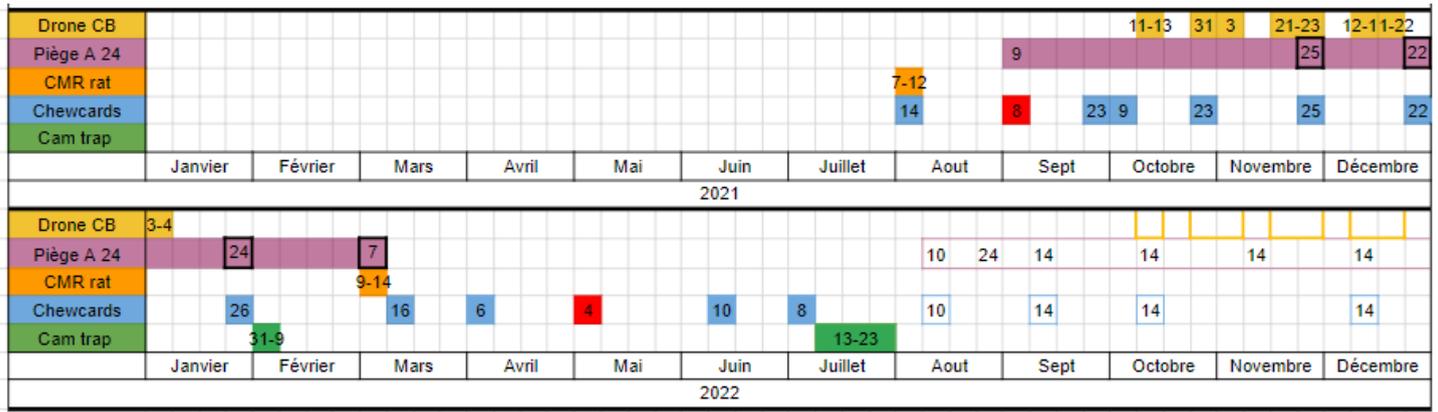
J = 6 passages dans une journée, case sans bordure = 1 seul passage dans la journée

J = Contrôle du nombre de déclenchement des pièges

J = Waxtags

J = Prévu mais n'a pas pu être faite

Annexe 1 : Frise des différents déploiements pour la lutte contre le rat et son suivi sur le site de Chiconi de 2019 à 2022 a) et Ironi-bé 2020-2022 b). Les sessions prévisionnelles apparaissent encadrées mais non remplies de couleur.



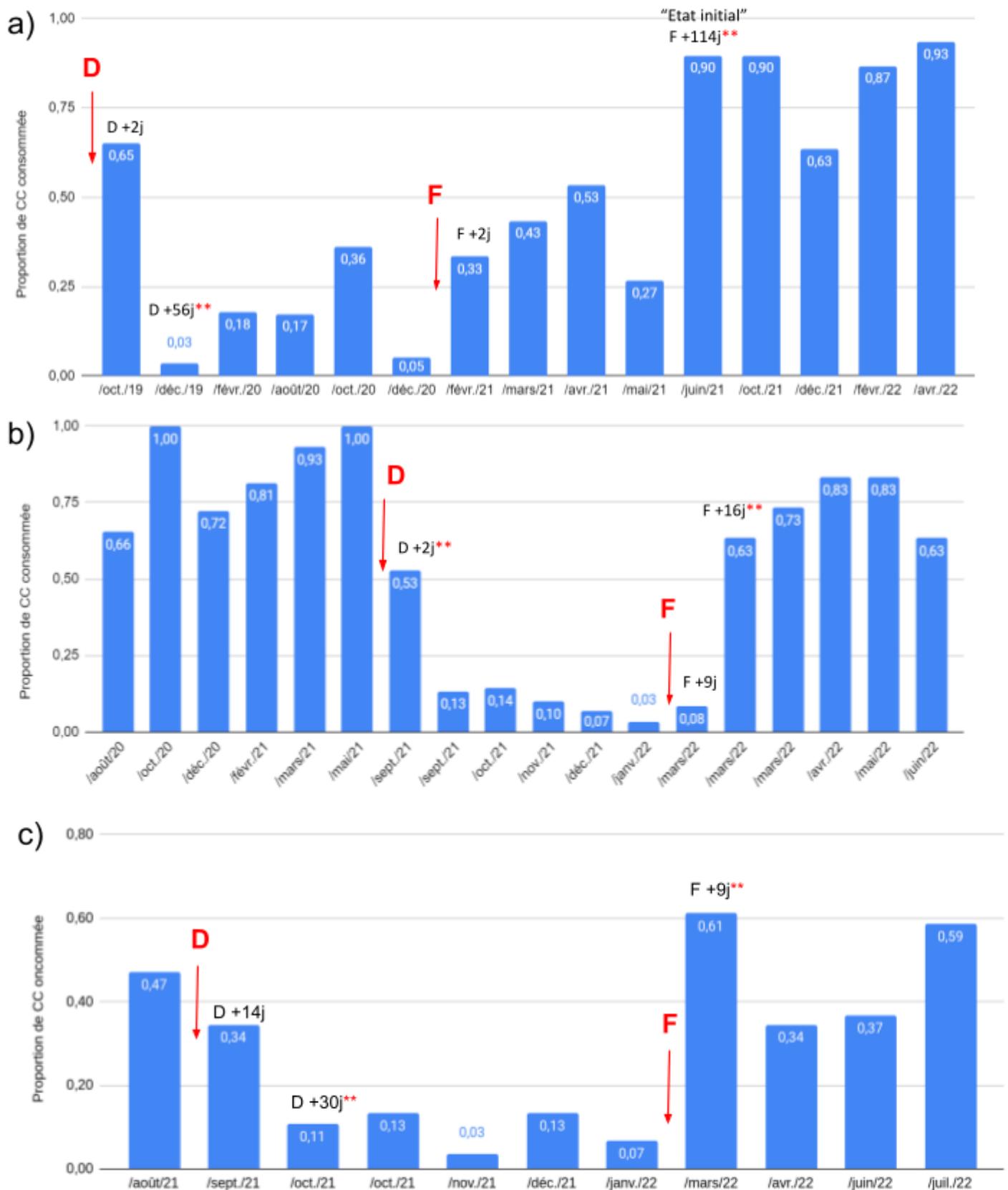
Annexe 2 : Frise des différents déploiements pour la lutte contre le rat et son suivi sur le site de Ironi-bé de 2021 à 2022. Les sessions prévisionnelles apparaissent encadrées mais non remplies de couleur.

Site	Session (etat initial/post lutte - date)	Nombre d'individus capturés	Nombre de recaptures	Nombre max de fois qu'un même individu est recapturé
Chiconi	08/2021 "Etat initial"	35	38	5
	03/2021 Post lutte	18	20	4
Ironi-bé	03/2021 Etat initial (humide)	26	44	2
	08/2021 Etat initial (sec)	12	33	6
	03/2022 Post lutte	4	2	6
Bouyouni	08/2021 Etat initial	36	18	3
	03/2022 Post lutte	25	27	6

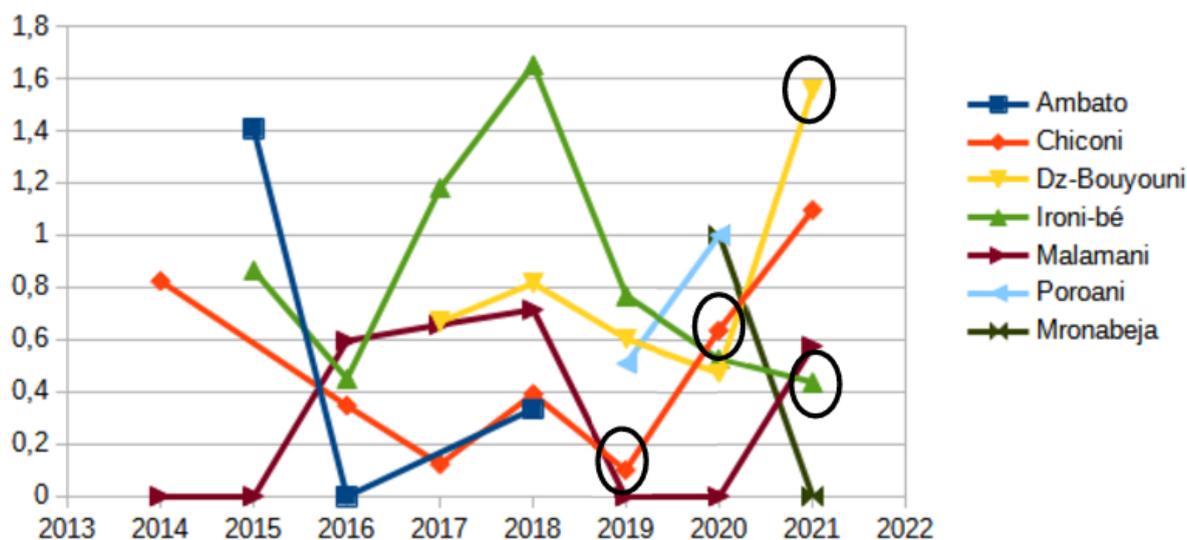
Annexe 3 : Synthèse des captures et recaptures de rats lors des sessions CMR sur chaque site.

Modèle	AICc	Δ AICc
$g0 \sim \text{site}, \sigma \sim \text{site}$	2191.241	0
$g0 \sim \text{group} + \text{site}, \sigma \sim \text{site}$	2193.712	2.471
$g0 \sim \text{session}, \sigma \sim \text{site}$	2194.029	2.788
$g0 \sim \text{site}, \sigma \sim 1$	2202.831	11.590
$g0 \sim \text{group}, \sigma \sim \text{site}$	2211.518	20.277
$g0 \sim 1, \sigma \sim \text{site}$	2213.095	21.854
$g0 \sim 1, \sigma \sim \text{session}$	2217.304	26.063
$g0 \sim 1, \sigma \sim \text{site} + \text{group}$	2218.495	27.254
$g0 \sim \text{group}, \sigma \sim 1$	2219.532	28.291
$g0 \sim 1, \sigma \sim 1$	2220.899	29.658
$g0 \sim \text{group}, \sigma \sim \text{group}$	2225.799	34.558
$g0 \sim 1, \sigma \sim \text{group}$	2225.980	34.739

Annexe 4 : Résultats des différents modèles lancés à partir des données CMR des trois sites sous R. Site = Chiconi, Bouyouni ou Ironi-bé ; Session = un site relevé à une certaine date ; group = Femelle, Mâle ou Juvénile. Le meilleur modèle fait varier $g(0)$, soit la probabilité de capture au centre du domaine vital du rat, ainsi que σ , soit le facteur d'échelle qui détermine le diamètre du domaine vital, selon le site. Le meilleur modèle a un AICc de 2191.241. Le second meilleur modèle a un Δ AICc > 2 et n'est donc pas retenu pour les analyses.



Annexe 5 : Proportion de chewcards (CC) consommée par des rats sur les sites de Chiconi a) Ironi-bé b) et Bouyouni c), au cours du temps. D = Début de la lutte ; F = Fin de la lutte. “**” note une différence significative selon le test de Chi2 ou non paramétrique de Fisher, comparant la proportion de CC consommée de la session et celui de l’état initial.



Annexe 6 : Evolution de l'indice du succès reproducteur (iSR) du Crabier blanc depuis 2014 sur l'ensemble des héronnières identifiées sur Mayotte. Les années sans valeur correspondent à une année sans activité de la héronnière. Les années entourées d'un rond noir correspondent à celles où la lutte a été déployée sur le site en question. Hormis un pic de l'iSR sur tous les sites en 2018, aucune autre tendance générale n'est observée depuis 2014. Les iSR des années de lutte de 2019 pour Chiconi et de 2021 à Ironi-bé sont inférieurs à ceux estimés sur ces sites l'année passée. Au contraire l'iSR a triplé sur Bouyouni l'année de lutte en 2021 comparé à 2020.

Site	Amplitude de variation de l'iSR (2014-2021)	IC95% de la variation interannuelle (2014-2021)	Nombre d'années actives suivies
Ambato	1.41	0.83	3
Chiconi	0.97	0.35	7
Bouyouni	0.34	0.14	5
Ironi-bé	1.20	0.36	7
Malamani	0.14	0.06	7
Poroani	0.49	0.48	2
Mronabeja	1	0.98	2

Annexe 7 : Amplitude de variation de l'indicateur du succès reproducteur (iSR) sur chaque site, uniquement les années d'absence de lutte contre le rat, de 2014 à 2021. Intervalle de confiance 95% de ces mêmes données.

```
> summary(SR.anova1)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
colonie 6 0.6457  0.1076  0.502  0.794
Lutte    1 0.0012  0.0012  0.006  0.941
annee    7 0.7742  0.1106  0.516  0.805
colonie:Lutte 2 0.7759  0.3880  1.811  0.209
Lutte:annee 1 0.0428  0.0428  0.200  0.664
Residuals 11 2.3563  0.2142
```

Annexe 8 : Résultats de l'Ancova permettant notamment de noter l'absence d'effet particulier de la lutte sur le succès reproducteur du Crabier blanc ($p > 0.05$).

Résumé et mots clés

Mots clés : *Rattus rattus* ; *Ardeola idae* ; Lutte mécanique A24 ; mangrove ; Mayotte ; CMR ;

Domaine vital

Résumé : Le rat (*Rattus spp*) est considéré comme une espèce exotique envahissante (EEE) dans de nombreux endroits du globe. Il a notamment été introduit par l'Homme sur 82% des îles, où il y est considéré comme un "fléau écologique". La lutte chimique a beaucoup été utilisée contre le rat, mais elle a des effets sur des espèces non cibles. Les pièges mécaniques classiques semblent efficaces mais très coûteux, notamment en main d'œuvre, car ils demandent un réappâtage et un réarmement régulier. Les récents pièges mécaniques A24 sont prévus pour diffuser de l'appât pendant 6 mois et se réarmer automatiquement jusqu'à 24 fois, réduisant ainsi fortement le coût de main d'œuvre. Cette alternative à la lutte chimique a été déployée plus de 6 mois dans les mangroves mahoraises pour lutter contre le rat noir (*Rattus rattus*), suspecté de consommer les oeufs et poussins d'une espèce en danger d'extinction: le Crabier blanc (*Ardeola idae*). L'efficacité des pièges A24 est parfois critiquée. Cette étude est la première à évaluer l'effet de la lutte avec A24 en mangrove et via un suivi de densité estimé par CMR (package SECR). Les premiers résultats montrent une tendance à la diminution de la densité de rats, mais aucun effet notable sur le succès reproducteur du Crabier blanc après une ou deux saisons de lutte. La lutte devrait être optimisée avec une réduction de l'espacement des A24 sous le seuil du diamètre du domaine vital du rat sur chaque site. Un suivi à plus long terme avec des indicateurs plus robustes est nécessaire pour conclure des effets de cette lutte.

Abstract : The rat (*Rattus spp*) is considered an invasive alien species (IAS) in many places around the globe. It has been introduced by humans to 82% of islands, where it is considered an "ecological scourge". Chemical control has been used extensively against rats, but it has effects on non-target species. Conventional mechanical traps appear to be effective but very expensive , especially in terms of human labour, as they require regular baiting and rearming. The new A24 mechanical traps are designed to release bait for 6 months and automatically reset up to 24 times, thus greatly reducing the labour input. This alternative to chemical control has been deployed more than 6 months in the Mahoran mangroves to fight against the black rat (*Rattus rattus*), suspected of eating the eggs and chicks of an endangered species, the Madagascar Pond Heron (*Ardeola idae*). The effectiveness of A24 traps is sometimes criticized. This study is the first to evaluate the effect of A24 control in a mangrove habitat and via a CMR-estimated density monitoring (SECR package). Preliminary results show a decreasing trend in rat density but no significant effect on the reproductive success of Madagascar Pond Heron after one or two seasons of control. Control should be optimized with a reduction in A24 spacing below the threshold of the rat home range diameter at each site. Longer-term monitoring with more robust indicators is necessary to conclude on the control's effect.