



HAL
open science

Apport de la macro écologie pour l'étude des conséquences des changements globaux sur la biodiversité

Céline Bellard

► **To cite this version:**

Céline Bellard. Apport de la macro écologie pour l'étude des conséquences des changements globaux sur la biodiversité. Sciences de l'environnement. Université Paris Saclay, 2022. tel-04443353

HAL Id: tel-04443353

<https://hal.science/tel-04443353>

Submitted on 7 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Apport de la macroécologie pour l'étude des conséquences des changements globaux sur la biodiversité

**Habilitation à diriger des recherches
de l'Université Paris-Saclay**

**présentée et soutenue au laboratoire Ecologie,
Systématique et Evolution le 14 Septembre, par**

Céline BELLARD

Composition du jury

Nathalie FRASCARIA Professeur Agro Paris Tech, Lab ESE, Univ. Paris Saclay	Rapporteuse
Thierry OBERDORFF Dir de recherche IRD, Lab EDB, Univ. Toulouse III Paul Sabatier	Rapporteur
François SARRAZIN Professeur Sorbonne Univ, CESCO, MNHN-CNRS-SU	Rapporteur
Olivier DANGLES Dir. de recherche IRD, CEFE, Univ. Paul Valéry Montpellier	Examineur
Emmanuelle PORCHER Professeur MNHN, CESCO, MNHN- CNRS-SU	Examinatrice

En premier lieu, je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont acceptés d'évaluer cette HDR malgré leurs emplois du temps chargés.

A travers ces quelques lignes, je souhaite aussi prendre le temps de remercier l'ensemble des personnes qui m'ont accompagnée tout au long de ces années de recherche, qui m'ont soutenue, aidée, et conseillée.

Tout d'abord une mention spéciale et un immense merci à Elsa Bonnaud et Franck Courchamp avec qui je travaille depuis mon arrivée au laboratoire et avec qui nous formons l'équipe BioDym au sein du laboratoire ESE. Je n'aurais pas pu espérer un meilleur environnement dans laquelle développer mes projets. Nous sommes tous trois très complémentaires et c'est ce qui je pense est à l'origine de la réussite de cette équipe. Franck avec ton enthousiasme permanent, ta persévérance extraordinaire, tes idées audacieuses et ton sens de la stratégie et de la communication, merci de m'avoir soutenu tout au long de ces années. Je reste admirative de tes nombreuses qualités scientifiques et j'espère pouvoir continuer à m'en inspirer. Elsa, tout simplement merci du soutien que tu m'as apporté ces dernières années. Tu es toujours positive, disponible en dépit de tes nombreux cours, stagiaires, projets, et réunions. J'ai beaucoup de chance de te compter parmi mes collègues. Parmi tes nombreuses qualités, je tiens à souligner ta résilience pour aider les jeunes chercheurs qui m'inspire chaque jour.

Plus largement et au-delà du laboratoire je tiens tout particulièrement à remercier Boris Leroy avec qui je collabore depuis des années et avec qui nous pouvons discuter des articles, des projets, des problèmes méthodologiques et des enjeux de la recherche en général, et qui m'amène souvent de nouveaux axes de réflexion. Il fait partie de ces collègues qui vous poussent à creuser toutes les facettes d'une question, un bon millier de fois pour être sûre que vous n'avez rien oublié. Merci également de m'accueillir si souvent au MNHN avec des merveilleux.

Je remercie également Christophe Diagne, fraîchement recruté à l'IRD, qui a su devenir indispensable au sein de l'équipe et qui m'a permis de toujours continuer à travailler dans une excellente atmosphère et un état d'esprit positif.

Evidemment, je souhaite remercier l'ensemble des étudiants que j'ai eu la chance d'encadrer ces dernières années et qui m'ont beaucoup appris sur moi-même, m'ont amené à me remettre en question et à être une meilleure encadrante. Merci à Camille Leclerc avec qui j'ai parcouru un long chemin depuis la thèse et qui m'a énormément apporté au cours des années de supervision. J'ai fait mes débuts d'encadrement à tes côtés et j'ai beaucoup aimé travailler avec toi pendant toutes ces années. J'espère que l'on poursuivra cette belle collaboration et que tu trouveras un poste qui te permettra de t'épanouir. Je tiens aussi à remercier mes deux doctorantes actuelles Clara Marino et Camille Bernery qui ont toutes deux des grandes qualités scientifiques et humaines et qui m'inspirent chaque jour pour être une meilleure encadrante. Je retire une grande satisfaction à travailler avec vous au quotidien, à réfléchir à des projets, à vous aider à devenir des jeunes chercheuses. Vous êtes une de mes principales motivations pour passer outre la pénibilité du trajet en métro, rer et bus. Je souhaite plus largement remercier, l'ensemble des étudiants avec qui j'ai travaillé ces dernières années et qui m'ont tous apporté quelque chose (Mathilde, Camille, Lysandre, Yan, Delphine).

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres du laboratoire qui ont su m'accompagner et m'aider pour mener mes recherches : Jane Lecomte, Christophe Hanot, Emmanuelle Baudry, Carmen Bessa-Gomes pour n'en citer qu'une poignée, ainsi que les gestionnaires qui sont toujours d'une grande aide Nathalie Lecat, Nadia Livet, et Sandrine Dessaints. Mes derniers remerciements vont à l'ensemble des étudiants présents au quotidien, qui participent fortement à la vie agréable du laboratoire et avec qui j'apprécie de discuter chaque jour (Martin, Suzy, Léo, Ugo, Elena, Thomas, Fabienne, Justine, Céline, Anna).

Table des matières

I. Curriculum vitae	
1. Cursus	3
2. Encadrement d'étudiants	3
3. Responsabilités scientifiques et académiques	4
4. Activités d'expertises scientifiques	5
5. Financements des projets de recherche	5
6. Interventions dans les médias et vulgarisation	6
7. Distinctions	7
8. Listes des titres et travaux	7
9. Activités d'enseignement	13
II. Résumé de mon parcours de recherche	
1. Les effets des changements globaux sur la biodiversité	14
2. Les effets des invasions biologiques sur la biodiversité	21
3. Projets en collaboration	27
III. Projet de recherche et d'encadrements	
1. Axe 1 : Poursuite de l'étude des grands patrons de distribution des espèces envahissantes et de leurs principaux « drivers » à travers les théories de la biogéographie insulaire	30
2. Axe 2 : Améliorer les scénarios de prédictions concernant la menace des invasions biologiques	32
3. Axe 3 : Interactions entre les changements climatiques et les invasions biologiques	35
4. Conclusion	38
IV. Références	39

Liste des figures :

- **Figure 1** : Représentation des principales associations de menace pour les espèces insulaires éteintes et actuellement menacées d'extinctions.
- **Figure 2** : Relation entre la diversité taxonomique et la diversité fonctionnelle des espèces endémiques insulaires chez les oiseaux et les mammifères menacés.
- **Figure 3** : Représentation de la relation aire-diversité pour la diversité taxonomique, phylogénétique et fonctionnelle.
- **Figure 4** : Distribution spatiale des menaces cumulées (hausse du niveau des mers, changement climatique local, changements d'utilisation des terres, et invasions biologiques) aux Etats-Unis en fonction des différents groupes taxonomiques considérés (amphibiens, oiseaux, mammifères et reptiles).
- **Figure 5** : Illustration des trois différentes étapes pour mesurer la vulnérabilité des mammifères endémiques aux changements climatiques.
- **Figure 6** : Carte représentant les localisations des 21 clusters identifiés comme les *hotspots* d'invasions.
- **Figure 7** : Pourcentage de diversité phylogénétique et fonctionnelle menacé par les invasions biologiques pour les oiseaux et les mammifères selon les mécanismes d'invasions impliqués.
- **Figure 8** : Comparaison des « Effect Sizes » des traits écologiques entre les espèces menacées d'extinctions par les espèces envahissantes et les espèces qui ne sont pas menacées d'extinctions mais exposées aux espèces envahissantes pour l'ensemble des tétrapodes.

I. Curriculum vitae

Céline Bellard – Chargé de recherche CNRS, 35 ans

E-mail : celine.bellard@universite-paris-saclay.fr

CNRS – UMR8079 – Laboratoire d'Ecologie, Systématique & Evolution, Université Paris Saclay

1. Cursus

Chargé de recherche CNRS (2018) basée au Laboratoire d'Ecologie, Systématique & Evolution, Université Paris Saclay

Chercheur CDD (2017) au Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris France –dont six mois comme chercheur invité à l'Univ. Sapienza de Rome, Italie

Post-doctorat (2014-2016) AXA fellowship Research Fund à l'Univ. College of London, Royaume-Uni

Doctorat (2010-2013) Université Paris Sud, finance par une bourse CNRS (BDI). Titre: « Impacts of climate change on future of biodiversity », (Dir. F. Courchamp), Laboratoire ESE

2. Encadrements d'étudiants

Philosophie d'encadrement : A ce jour, j'ai encadré trois étudiantes en thèse. A chaque début d'encadrement de thèse, je discute avec l'étudiant pour comprendre son projet de carrière et mieux cerner ses attentes par rapport à la thèse. Je saisis aussi cette opportunité pour lui expliquer mes attentes en tant qu'encadrante. J'essaie de m'adapter, dans la mesure du possible, au mode de fonctionnement de l'étudiant, en étant plus présente et plus directive ou en laissant plus de temps entre les discussions et d'indépendance selon les besoins de l'étudiant. J'ai par ailleurs suivi une formation à l'encadrement proposée par l'ED qui m'a permis d'échanger sur les enjeux liés à l'encadrement mais aussi d'acquérir des outils notamment de communication pour améliorer la gestion de la thèse. Selon moi, le but reste toujours d'aider l'étudiant à gagner le maximum d'indépendance, pour être capable d'ici la fin de la thèse (i) d'initier ses propres projets de recherche, (ii) d'établir un réseau de collaborateurs au sein duquel l'étudiant est reconnu, (iii) et de devenir un des experts de son sujet de thèse. Les aspects humain et relationnel sont également très importants dans le cadre d'un encadrement. Il me semble indispensable d'établir une relation de confiance où l'étudiant peut s'exprimer librement. Les étudiants et moi-même profitons aussi du dynamisme et de la bonne entente au sein de l'équipe BioDym (membres permanents et non-permanents) en cas de difficultés. Mes expériences actuelles se sont toutes très bien déroulées. Actuellement, j'encadre à 100% Clara Marino, avec qui nous avons obtenu une bourse ENS pour poursuivre une partie de son travail de master 2 recherche sur les conséquences des invasions de vertébrés dans le cadre du changement climatique. Je co-encadre aussi Camille Bernery (bourse de l'Ecole Doctorale) avec Franck Courchamp et Boris Leroy sur les facteurs (socio-économiques et les traits d'histoire de vie) qui favorisent le succès des invasions (vertébrés aquatiques et terrestres). Ces deux thèses sont en cours et ont déjà fait l'objet de publications. Enfin, j'ai encadré Camille Leclerc en tant qu'étudiante en thèse (demande de dérogation HDR, encadrement 80%) avec le soutien de Franck Courchamp. Son travail de thèse a fait l'objet de 4 articles publiés dont un dans la prestigieuse revue *Nature Communications*. Camille est actuellement en post-doctorat à l'INRAE pour étudier les réseaux d'interactions des communautés de poissons.

- Sept 2020-23 **Clara Marino** “Consequences of vertebrate invasions under climate change scenarios”, bourse ENS (1 article accepté , 1 article soumis et 1 article publié en co-auteure)
- Oct 2019-22 **Camille Bernery** (co-supervision avec F. Courchamp (ESE) et B. Leroy (MNHN)) bourse Ecole Doctorale SEVE, “Freshwater fish invasion, their direct and indirect drivers” (1 article publié en 1^{er} et 1 en tant que co-auteure, 1 article en révision mineur et 1 article soumis)
- Oct 2016-19 **Camille Leclerc**, “Impacts of past, current and future threats on insular biodiversity” (4 articles publiés), dérogation HDR obtenue

Encadrements de plusieurs stages de M2 Recherche et de post-master

- 2022 Y. Descloitres M2R Bordeaux, co-supervision C. Marino
- 2022 L. Jourdain M1 MNHN, co-supervision C. Marino
- 2019 (6 m.) C. Marino (ENS) Master 2 R Sorbonne Univ.
C. Magneville (co-supervision) M2R Rennes, co-supervision C. Leclerc
M. Vimont (co-supervision) M2 R Rennes, co-supervision F. Courchamp
- 2016 (6 m.) D. Ducros, post-master
- 2016 (6m) H. Meunier, master 2R EBE, Paris, co-supervision M. Barbet-Massin
- 2015 (6m) R. Delsol, master 2R Rennes, co-supervision B. Leroy
- 2012-2014 C. Leclerc, master 2R EBE et en tant que CDD post-master

3. Responsabilités scientifiques et académiques

Au cours des dix dernières années, j’ai évalué des articles pour de nombreuses revues internationales à comité de lecture dont *Ecology letters*, *Ecography*, *Nature*, *Nature comm. et Nature Ecology & Evolution*, *Global Change Biology*, *Global Ecology and Biogeography*, *Ecological applications*, *Proceedings of the Royal Society B* (voir mon profil [publons](#)), j’ai également occupé le rôle d’éditrice associée au sein de la revue *Journal of Applied Ecology* et *Frontiers in Conservation Science*. Par ailleurs, depuis 2020 je suis **éditrice en chef pour la revue *Diversity and Distributions***.

- 2020- **Editrice en chef** de la revue *Diversity and Distributions* (IF 5.139)
- 2020- **Editrice associée** de la revue *Frontiers in Conservation Science*
- 2019- **Editrice associée** de la revue *Diversity and Distributions* (IF 5.139)
- 2015-19 **Editrice associée** de la revue *Journal of Applied Ecology* (IF 5.84)
- 2015- **Evaluation** de demande de financements

J’ai aussi participé à plusieurs évaluations pour des appels d’offres notamment pour la British

Ecological Society, European Science Foundation, College of reviewers, Israel Ministry of Science, Technology and Space, Kazakstan research institute. Mes responsabilités académiques impliquent également la participation à des jurys de master chaque année (recherche et professionnel) ainsi qu'au tutorat de 2 à 3 étudiants de master par an.

2020- **Membre nommée** du comité d'évaluation Flanders research foundation FWO (évaluation des demandes de PhD et post-doc fellowships : rédaction de rapports, réalisation des *interviews* et des rapports de restitution (environ 25 par an)).

4. Activités d'expertises scientifiques

Je fais actuellement partie du comité de relecture "Changement climatique et EEE, quels impacts et conséquences pour la gestion ? » menés par l'UICN France. Au cours des dernières années j'ai également participé à la rédaction de rapports d'expertise pour le GIEC, IPBES ou encore les Nations Unis.

- **IPBES: Contributing author of the Invasive alien species assessment Invasive species (chapter 4, in prep)**
- **IPBES: Contributing author of the regional assessment (Europe and central Asia) (chapter 3 and 4)** and contributing author of the Global assessment on biodiversity and ecosystem services IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- **IPCC: Contributing Author of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group 2 Invasive species Chapter.** Settele J, Scholes R, Betts R, Bunn S, Leadley P, Nepstad D, Overpeck JT, Taboada MA (2014). Terrestrial and Inland Water Systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 271-359.
- **GBO-4: Lead Author of the Global Biodiversity Outlook-4 (Target 9: Invasive species)** Leadley, P., Krug, C., Alkemade, R., Pereira, H., Sumaila, U., Walpole, M., Marques, A., Newbold, T, Teh, L., van Kolck, J., **Bellard, C.**, Januchowski-Hartley, S. and Mumby, P. (2014) *Progress towards the Aichi Biodiversity Targets: an assessment of biodiversity trends, policy scenarios and key actions* Montreal, QC, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity

5. Financements des projets de recherche

Depuis mon recrutement au CNRS, j'ai répondu à différents types de financements en tant que porteur (e.g., appel à projet CNRS Momentum, ANR JCJC) ou collaborateur (e.g., CESAB, Biodiversa). Bien que certaines de ces demandes n'aient pas encore abouti, j'ai obtenu des bourses de thèses (Ecole doctorale, ENS, etc...) et de l'argent de fonctionnement (CNRS jeunes chercheurs et part chercheur de l'argent d'équipe soit un total de 16 000 euros) ce qui m'a permis de continuer mes travaux et le développement d'un groupe dans de bonnes conditions en finançant notamment des gratifications de stage. Je participe également en tant que collaboratrice à des projets financés tel que le projet Invacost porté par Franck Courchamp. En parallèle, je continue à postuler à des appels à projets nationaux et

internationaux (e.g., demande CESAB 2022 en tant que PI) selon les appels d'offres proposés. Mon travail ne nécessitant pas des moyens financiers importants, je recherche principalement des financements pour des salaires de post docs et de doctorants.

NOM	COORDINATEUR PRINCIPAL	ANNEE	SUCCES
CESAB	Céline Bellard-Daniel Kissling	2022	?
ANR	Céline Bellard	2021	Non financé
GACR (CZECHIA)	Ivan Jaric	2021	Non financé
ENS PHD	Céline Bellard-Clara Marino	2020-2023	Financé
CESAB	Christine Meynard & Jonathan Lenoir	2020	Non financé
PHD FELLOWSHIP (DOCTORAL SCHOOL)	Céline Bellard-Franck Courchamp-B. Leroy	2019-2022	Financé (C. Bernery)
CHAIRE AXA INVASIONS BIOLOGIQUES	Franck Courchamp	2019-2024	Non financé
CNRS MOMENTUM	Céline Bellard	2018	Non financé
BIODIVERSA - ALIEN SCENARIO	Franz Essl	2019-2022	Financé
BNP	Franck Courchamp	2016-2019	PhD Financé (Camille Leclerc)
BIODIVERSA- ODYSSEUS	Bernard Huguény	2016-2019	Financé (post doc fellowship)
BIODIVERSA	David Wardle	2013-2016	European Commission within the 7th Framework Programme

6. Interventions dans les médias et vulgarisation

Dès le début dans la recherche, j'ai eu à cœur de participer à des actions de vulgarisation de la recherche et à accepter les sollicitations des journalistes sur mes thématiques principales. J'ai ainsi participé à des articles de presse écrite (Sciences et Vie, Politis, France Culture, etc...).

Exemples d'intervention au cours des 5 dernières années :

2022	JCR Celebrating achievements of French women
2021	Participation à un livre portrait dans le cadre du congrès mondial de la Nature de l'UICN
2021	Sciences et vie Juin 2021 Biodiversité & Climat et sur les invasions biologiques
2021	Rédaction d'un court article sur l'érosion de la biodiversité pour le journal Politis lien
2019	Interview pour France Culture (Préservation de la biodiversité : Le laissée-pour-compte des politiques ?) interview
2018	Article pour "La recherche" sur les effets des changements climatiques sur les invasions biologiques
2017	Chapitre sur les espèces envahissantes et leur adaptation au changement

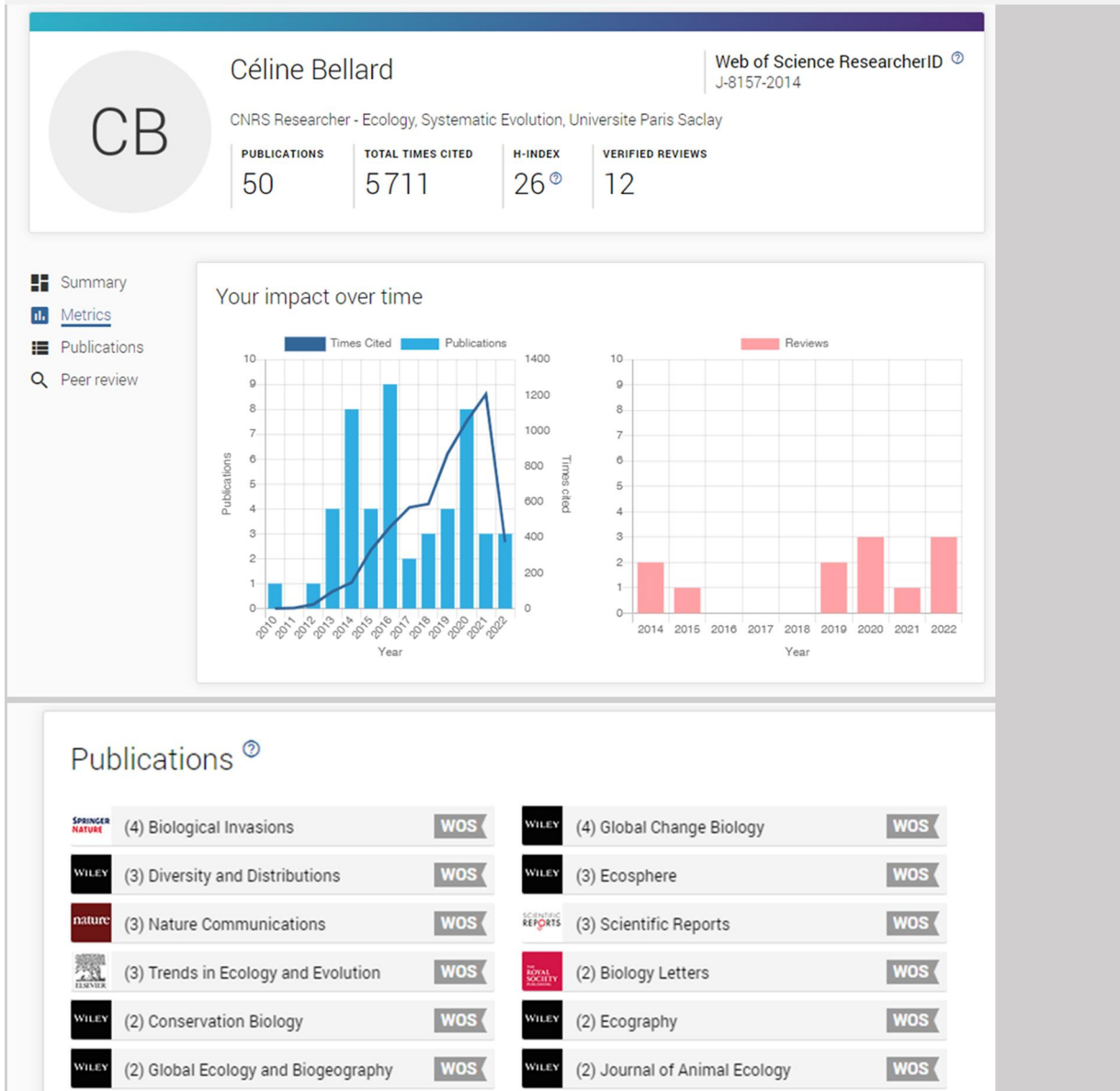
2017 climatique dans le cadre de la COP23 [lien](#)
 Brève IUCN: changement climatique et invasions biologiques, COP23 [lien](#)

7. Distinctions

2014-2016 **Axa fellowship 2 ans, 120 000 €**
 2014 Prix de la thèse par l'Académie des Sciences; "Les grandes avancées en biologie", **2 500€**
 2012 **Lauréate** : L'Oréal France-UNESCO for women in science; **15 000€**
 2010 **Premier prix poster** : at the annual day of the French Ecology Society, "Rising seas and lost islands", Paris

8. Listes des titres et travaux

Depuis 2010, je suis autrice de 50 publications (profil publons). Ces articles ont été cités plus de 5000 fois, *h-index* = 26. J'ai publié 19 articles en première autrice, 10 en second autrice et 6 en tant que dernière autrice dans des revues de biogéographie sur les changements globaux, dans des revues plus généralistes et des revues sur les invasions biologiques.



- **Articles dans des revues avec comité de lecture**

Dans la liste des publications ci-dessous, les noms des étudiants encadrés sont soulignés. Les articles sont disponibles en libre accès sur la plateforme [hal/céline bellard/](https://hal.celinebellard.fr/)

Au cours des dernières années, j'ai publié plus d'une quinzaine d'articles sur les conséquences des invasions biologiques et six articles visant à fournir des scénarios de prédiction de ces invasions dans le futur notamment en combinaison avec les effets des changements climatiques. J'ai aussi publié une dizaine d'articles portant sur la description des patrons de vulnérabilité aux changements globaux actuels dont le changement climatique et dix autres articles fournissant des scénarios de prédictions des conséquences de ces changements globaux à grande échelle. Alors que l'ensemble de ces publications portaient principalement sur les écosystèmes terrestres, plus récemment, j'ai publié trois articles portant sur le groupe des poissons d'eau douce.

- 50- **Bellard, C.**, [Marino, C.](#) & Courchamp, F. (2022) Ranking threats to biodiversity and why it doesn't matter. *Nature Communications* in press <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30339-y>
- 49- Angulo, E., Hoffmann, B.D., Ballesteros-Mejia, L. *et al.* (2022) Economic costs of invasive alien ants worldwide. *Biol Invasions*, in press <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02791-w>
- 48- [Marino, C.](#), Leclerc, C., & **Bellard, C.** (2022). Profiling insular vertebrates prone to biological invasions: What makes them vulnerable? *Global Change Biology*, 28, 1077– 1090.
- 47- [Leclerc, C.](#), [Magneville, C.](#), & **Bellard, C.** (2021). Conservation hotspots of insular endemic mammalian diversity at risk of extinction across a multidimensional approach. *Diversity and Distributions*, in press <https://doi.org/10.1111/ddi.13441>
- 46- **Bellard C.**, [Bernery C.](#) & Leclerc C., (2021) Looming extinctions due to invasive species: Irreversible loss of ecological strategy and evolutionary history. *Global Change Biology*, 27, 4967– 4979.
- 45- Jaric, I.; **Bellard, C.**; Correia, R.; Courchamp, F.; Douda, K.; Essl, F.; Jeschke, J.; Kalinkat, G.; Kalous, L.; Lennox, R.; Novoa, A.; Proulx, R.; Pyšek, P.; Soriano-Redondo, A.; S., A.; Vardi, R.; Verissimo, D.; Roll, U. (2021) Invasion culturomics and iEcology approaches to better understand biological invasions, *Conservation Biology* 35(2) 447-451
- 44- [Leclerc, C.](#), F. Courchamp & **C. Bellard**, (2020) Future climate change vulnerability of insular mammals, *Nature Communications* 11(1), 4943.
- 43- Lenzner B., Latombe G., Capinha C., **Bellard C.**, Courchamp F., Diagne C., Dullinger S., Golivets M., Severin D.H. Irl, Kuhn I., Leung B., Liu C., Moser D., Roura-Pascual N., Seebens H., Turbelin A., Weigelt P., Essl F. (2020) What will the future bring for biological invasions on islands? An expert-based assessment *Frontiers in Ecology and Evolution* 8, 280

- 42- **Bellard, C.**; Hugueny, B (2020) Importance of metapopulation dynamic to explain fish persistence in a river system, *Freshwater Biology* 65, 1858-1869
- 41- Jaric, I.; **Bellard, C.**; Courchamp, F.; Kalinkat, G.; Meinard, Y.; Roberts, D.; Correia, R; (2020) Societal attention toward extinction threats *Scientific reports* 10(1) 11085
- 40- Englund, G.; Öhlund, G.; Olajos, F.; Finstad, A.; **Bellard, C.**; Hugueny, B. (2020) Holocene extinctions of a top predator – effects of time, habitat area and habitat subdivision, *Journal of Animal Ecology* 89: 1202–1215
- 39- Li, X., **Bellard, C.**, Hu, F., and Li, H.. (2020). Effect of distance, area, and climate on the frequency of introduction and extinction events on islands and archipelagos *Ecosphere* 1(1):e03008
- 38- [Leclerc, C.](#), Villéger S. [Marino C.](#) & **C. Bellard** (2020) Global changes threaten functional and taxonomic diversity of insular species worldwide, *Diversity and Distributions*; 26: 402– 414
- 37- Li, X., Zhu H., Geisen S., **Bellard C.**, Hu F., Li H., Chen X., Liu M. (2020), Agriculture erases climate constraints on soil nematode communities across large spatial scales. *Global Change Biology*. 26, 919-930
- 36- Li, X., **Bellard, C.**, Hu, F. and Li, H. (2019), A comprehensive formula for decomposing change in community similarity into introduction and extinction events. *Ecography*. 42, 1714-1716
- 35- Castaneda I., **Bellard C.**, Jaric I., Pisanu B., Chapuis JL & Bonnaud E. (2019) Trophic patterns and home range size of two generalist urban carnivores: a review *Journal of Animal Ecology*, 307: 79-92
- 34- Blackburn T., **Bellard C.** and Ricciardi A. (2019), Alien versus native species as drivers of recent extinctions, *Frontiers in Ecology and the Environment*, [17\(4\) 203-207](#)
- 33- **Bellard, C.** , Englund, G. and Hugueny, B. (2019), Biotic and abiotic drivers of species loss rate in isolated lakes. *Journal of Animal Ecology*, 88:881-891
- 32- **Bellard C.**, Jeschke J., Leroy B. & G. Mace (2018) How climate change affects invasive species: names insights from modelling studies across the globe, *Ecology & Evolution*, 11, 5688-5700
- 31- [Leclerc C.](#), Courchamp F. & **Bellard C.**, (2018) Insular threat association worldwide within islands and taxa *Scientific reports*, **8**, 6393
- 30- Leroy B., [Delsol R.](#), Meynard C., Hugueny B. & **Bellard C.** (2018) Without quality presence-absence data, discrimination metrics such as TSS can be misleading measures of model performance, *Journal of Biogeography*; 45:1994–2002.

- 29- **Bellard C.***, Rysman JF*, Leroy B., Claud C. & Mace GM, (2017) A global picture of biological invasion threat on islands, *Nature Ecology & Evolution*, 1(12), 1862–1869. * co-first author
- 28- Courchamp F., Fournier A., **Bellard C.**, Bertelsmeier C., Bonnaud E., Jeschke JM & Russel J., Invasion Biology: specific problems and possible solutions (2017) *Trends in Ecology and Evolution*, 32, 13-22
- 27- Bradshaw C., Leroy B., **Bellard C.**, Roiz D., Albert C., Barbet-Massin M., Fournier A., Salles JM, Simard F. & F Courchamp (2016) Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects, *Nature communications*, 7, 12986
- 26- Hoffmann B., Luque G.M., **Bellard C.**, Holmes N. & C. J. Donlan, Improving invasive ant eradication as a conservation tool: A review, *Biological Conservation* 198 (2016) 37–49.
- 25- Leroy B., Meynard C., **Bellard C.** & Courchamp F. (2016) Virtual species, an R package to generate virtual species distribution, *Ecography* 39, 599-607
- 24- **C. Bellard**, B. Leroy, W. Thuiller, J-F Rysman & F. Courchamp, (2015) Major drivers of invasion risks throughout the world, *Ecosphere*, 7(3)
- 23- **C. Bellard**, P. Genovesi & J. Jeschke, (2016) Global patterns in vertebrates threatened by biological invasions, *Proceedings B* 283(20152454)
- 22- **C. Bellard**, P. Cassey & T. Blackburn, (2016) Alien species as a driver of recent extinctions, *Biology letters* 12(20150623)
- 21- **C. Bellard** & J. Jeschke (2015) A spatial mismatch between invader impacts and research activity, *Conservation biology* 30, 230–232.
- 20- B. Gallardo, A. Ziertitz, T. Adriaens, **C. Bellard**, P. Boets, R. Britton, J. Newman, J. Valkenburg & D. Aldridge, (2016) Transnational horizon scanning for invasive non-native species: a case study in western Europe, *Biological invasions* 18, 17-30
- 19- **C. Bellard**, [C. Leclerc](#) & F. Courchamp, (2015) Combined impacts of global changes on biodiversity across the USA, *Scientific reports*, 5, 11828
- 18- N. González-Munoz, **C. Bellard**, C. Leclerc, J-Y Meyer & F. Courchamp. (2015) Assessing current and future risks of invasion by *Miconia calvenscens* D.C. *Biological invasions* 17, 3337-3350
- 17- **C. Bellard**, [C. Leclerc](#), B. Hoffman & F. Courchamp, (2015) Vulnerability to climate change and sea-level rise of the 35th biodiversity hotspot, the Forests of East Australia, *Environmental Conservation* 43, 79-89
- 16- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Terrestrial and Inland Water Systems. In *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth*

Assessment Report (pp. 271-360). Cambridge: Cambridge University Press.

- 15- [C. Leclerc](#)*, **C. Bellard***, G.M. Luque & F. Courchamp, (2015) Overcoming extinction: recovery of the doomed Tibetan antelope, *Ecosphere*, 6(9) * co-first author
- 14- **C. Bellard**, J. Russel, B. Hoffman, [C. Leclerc](#) & F. Courchamp (2014), Adapting island conservation to climate change. Response to Andréfouët et al. *Trends in Ecology and Evolution*, 30, 2-3
- 13- A. Marques, H.M. Pereira, C. Krug, P.W. Leadley, P. Visconti, S.R. Januchowski-Hartley, R.M. Krug, R. Alkemade, **C. Bellard**, W. L. Cheung, V. Christensen, H. D. Cooper, T. Hirsch, R. Hoft, J. van Kolck, T. Newbold, J. Noonan-Mooney, E. C. Regan, C. Rondinini, U. R. Sumaila, L. Teh & M. Walpole, A framework to identify enabling and urgent actions for the 2020 Aichi Targets, *Basic and Applied Ecology*, 15, 633-638
- 12- D. P. Tittensor, M. Walpole, S. L. L. Hill, D. G. Boyce, G. L. Britten, Neil D. Burgess, S.H. M. Butchart, P. W. Leadley, E.C. Regan, R. Alkemade, R. Baumung, **C. Bellard**, et al., (2014), A mid term analysis of progress towards international biodiversity targets, *Science*, 346, 241-244
- 11- **C. Bellard**, [C. Leclerc](#), B. Leroy, M. Bakkeness, S. Veloz, W. Thuiller & F. Courchamp, Vulnerability of biodiversity hotspots to global changes, *Global Ecology and Biogeography*, 23, 1376-1386
- 10- B. Leroy, **C. Bellard**, A. Colliot, M. Vasseur, C. Courtial, M. Bakkenes, A. Carnard & F. Ysnel (2014), Forecasted climate and land use changes, and protected areas: the contrasting case of spiders, *Diversity and Distribution*, 20, 686-697
- 9- F. Courchamp, B. Hoffman, J. Russel, [C. Leclerc](#) & **C. Bellard** (2014) Keeping island afloat: climate change, sea-level rise and conservation, *Trends in Ecology and Evolution*, 29, 127-130
- 8- G.M. Luque, **C. Bellard**, C. Bertelsmeier, E. Bonnaud, P. Genovesi, D. Simberloff, & F. Courchamp (2013) The 100th of the world's worst invasive alien species. *Biological invasion*, 16, 981-985
- 7- **C. Bellard**, W. Thuiller, B. Leroy, M. Bakkeness, P. Genovesi & F. Courchamp. (2013) Will climate change promote future invasions? *Global Change Biology*, 19, 3740–3748
- 6- **C. Bellard**, [C. Leclerc](#) & F. Courchamp (2013) Impact of sea level rise on the French islands. *Nature Conservation* 5: 75-86.
- 5- G.M. Luque, **C. Bellard**, C. Bertelsmeier, E. Bonnaud, P. Genovesi, D. Simberloff & F. Courchamp. (2013) Monster fern makes IUCN invader list. *Correspondence in Nature*, 498: 37

- 4 **C. Bellard**, [C. Leclerc](#) & F. Courchamp. (2013) Impact of sea level rise on the ten insular biodiversity hotspots. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 203-212
- 3- A. Cornille, T. Giraud, **C. Bellard**, A. Tellier, B. Le Cam, M.J.M Smulders, J. Kleinschmit, I. Roldan-Ruiz & P. Gladioux (2013) Postglacial recolonization history of the European crabapple (*Malus sylvestris* Mill.), a wild contributor to the domesticated apple. *Molecular Ecology*, 22, 2249-2263
- 2- **C. Bellard**, C. Bertelsmeier, P. Leadley, W. Thuiller & F. Courchamp (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15, 365-377. **F1000**
- 1- Milner-Gulland E. J., Arroyo, B., **Bellard, C.**, Blanchard, J., Bunnefeld, N., Delibes-Mateos, M., Edwards, C., Nuno, A., Palazy, L., Reljic, S., Riera, P., T. Skrbinek (2010). *Biology letters*, 719-722

Submitted

51- [C. Marino](#) & **C. Bellard**, When origin, reproduction ability, and diet define the role of birds in invasions, under review *Global Ecology and Biogeography* 03/2022

52- [C. Bernery](#), **C. Bellard**, F. Courchamp, S. Brosse, R. Gozlan, I. Jaric, F. Teletchea, B. Leroy, Freshwater fish invasions: A comprehensive review. 2022. fahal-03564824f under review *Annual Reviews of Ecology, Evolution, and Systematics*

53- [C. Bernery](#), **C. Bellard**, F. Courchamp, S. Brosse, B. Leroy. Important characteristics determining the success of nonnative freshwater fish introduction, establishment, and impact. 2022. fahal-03563547f under review *Global Ecology and Biogeography* 02/2022

54- M. Robuchon, [C. Bernery](#), C. A. K. M. Dia, F. Courchamp, C. Diagne, G. Heringer, N. Kirichenko, S. Pavoine, D. Renault, V. Rezende, A-C. Vaissière, **C. Bellard** The conservation paradox of exotic species of economic concern. under review *Journal of applied ecology* May 2022

Chapitre de livre

Harold Levrel, Emmanuelle Baudry, Paul Leadley, Christian Mougin, Elsa Bonnaud, et al.. (2021) Les menaces sur la biodiversité. Enjeux de la transition écologique, EDP Sciences, 38p, 2021, 978-2-7598- 2662-9. fahal-03479058f

C. Bellard, [C. Leclerc](#) & F. Courchamp, Sea-level rise impact on biodiversity case study in Climate change biology book, in press (2019) edited by Yale University, T. Lovejoy and L. Hannah

Leclerc, C., Courchamp, F. & Bellard, C. (in prep.), Vulnérabilité des milieux insulaires aux changements globaux. In A. Pomade et al. (Eds.), Vulnérabilités environnementales : perspectives pluridisciplinaires, L'Harmattan.

- **Communications orales**

Conférences invitées

- | | |
|------|--|
| 2021 | Ecoclim, Crise de la biodiversité, Paris, France |
| 2019 | Workshop Invacost, Paris, France |
| 2019 | Plenary session of the 6 th Young Natural History Scientists Meeting, France |
| 2017 | Symposium British Ecological Society: The macroecology of alien species, Durham, United Kingdom |
| 2016 | Workshop: Cost action: Time lags in invasion, Vianden, Luxembourg |
| 2015 | CEE Symposium, Linnean Society London, Biological invasions and Climate change, UK |
| 2015 | Our common future under climate change, "Effects of climate change and other driver of global changes on biodiversity" Paris, France |
| 2014 | Workshop Global Biodiversity Outlook-4, Vancouver, Canada |
| 2012 | Workshop: Invasive species – threat and management, "What has ecological theory to offer when deciding how to deal with established invasive species?" Bialoweza, Poland |

Conférences (en tant que 1^{ère} auteure) durant les 6 dernières années

- | | |
|------|---|
| 2022 | Intecol, Genève, Suisse |
| 2021 | International Biogeography Society, Amsterdam, Pays-Bas |
| 2019 | International Biogeography Society, Malaga: Network of biological invasions impacts on islands |
| 2016 | French Society of Ecology and research group of biological invasions, Impacts des espèces envahissantes sur les vertébrés endémiques, Marseille, France |
| 2016 | Island biology 2016, Impacts of biological invasion on insular habitats, Azores, Portugal |

9. Activités d'enseignement

Après avoir effectué un monitorat pendant ma thèse (64h/an), où j'ai enseigné dans différentes matières telles que la biologie de la conservation, l'écologie, la génétique des populations, j'ai ensuite continué à enseigner de façon ponctuelle (<10h/an) au sein de l'ENS, de l'école polytechnique et de l'Université Paris-Saclay sur mes thématiques de recherche principale (invasions biologiques, changement climatique, modélisation).

II. Résumé de mon parcours de recherche

Mes travaux s'inscrivent dans la thématique de la **biogéographie de la conservation**. Je me suis notamment intéressée à la réponse de la biodiversité aux changements climatiques, mais aussi à l'étude de la dynamique des invasions biologiques et leurs conséquences pour la biodiversité. J'ai notamment cherché à comprendre le rôle des facteurs climatiques, physiques et humains dans les patrons de distribution actuels des invasions biologiques, afin de mieux prédire la dynamique de la biodiversité menacée. Plus récemment, je me suis concentrée sur la caractérisation des effets des invasions biologiques sur la biodiversité mondiale. *In fine*, une grande partie de mes travaux s'est portée sur l'étude des menaces qui pèsent sur les écosystèmes insulaires, ceux-ci comptant parmi les écosystèmes les plus fragiles de la planète face aux invasions biologiques d'une part et aux changements climatiques d'autre part.

J'ai donc mené mon activité de recherche autour de deux grandes thématiques :

- (i) l'étude des effets des changements globaux sur la biodiversité,
- (ii) l'étude des invasions biologiques et de leurs conséquences

Dans cette section, je vais présenter une partie de mes travaux associés à ces deux grandes thématiques et en décrire les grandes lignes afin d'illustrer le lien avec mon projet de recherche.

1. Les effets des changements globaux sur la biodiversité

A- Description des impacts observés des changements globaux

Dès 2010, je me suis intéressée à l'impact des changements globaux sur la biodiversité à travers l'élaboration d'un article bibliographique sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité (Bellard *et al.*, 2012). En plus d'être exposées aux différentes composantes des changements climatiques, les espèces sont affectées par d'autres facteurs anthropiques de perte de biodiversité appelés changements globaux. Pourtant, en raison de la complexité de la modélisation de plusieurs menaces, la grande majorité des études prédictives se focalisent sur l'étude d'une seule menace (e.g., (González-Muñoz *et al.*, 2015)). Au fur et à mesure de mes travaux, j'ai réalisé qu'étudier indépendamment les facteurs de perte de biodiversité n'était pas suffisant puisque leurs effets se cumulent et peuvent agir en synergie et ainsi modifier la dynamique de la biodiversité de manière non linéaire. Au final, ne pas tenir compte de l'ensemble de ces menaces de manière combinée peut fortement amoindrir l'efficacité des stratégies de conservation. Ainsi, j'ai souhaité étudier l'exposition des 34 *hotspots* de biodiversité à la fois i) aux changements climatiques, à travers des analyses de climats analogues, ii) à la présence d'espèces envahissantes, en utilisant les résultats de mes précédents travaux, et iii) à la perte d'habitats naturels au travers d'une analyse de changements d'utilisations des terres d'ici à 2080 (Bellard *et al.*, 2014). Ces travaux ont permis d'identifier **certaines hotspots dont le Sundaland, l'Indo-burma et les îles caribéennes** prédits pour être les plus exposés à cette **combinaison de menaces**. Ces régions étant inscrites comme des priorités de conservation avec au moins un milliard de dollars investis (Schmitt, 2012), ce travail a permis de mettre en exergue l'importance d'utiliser une approche multi-factorielle pour protéger la biodiversité de manière efficace. Le travail que j'ai mené sur les *hotspots* a contribué à focaliser l'attention sur ces régions, et ont depuis été étudiés dans un contexte de changements globaux afin d'évaluer les conséquences de ces changements sur la biodiversité présente au sein de ces régions (275 citations, e.g., Marchese, 2015;

Struebig *et al.*, 2015; Trindade, Santos & Artoni, 2020)).

J'ai poursuivi cette thématique de recherche par le biais des travaux de thèse de Camille Leclerc débutés en 2016 sous ma direction, et portant sur l'étude des effets des changements globaux sur les espèces endémiques insulaires. Ces travaux ont mis en évidence la vulnérabilité de 15 régions insulaires aux combinaisons de menaces telles que la perte d'habitat, les invasions biologiques, ou encore la surexploitation des espèces, en utilisant les méthodes issues de la théorie des graphes pour mettre en évidence les menaces combinées. Ce travail a été publié dans la revue *Scientific reports* (Leclerc, Courchamp & Bellard, 2018), voir aussi la Figure 1). Il démontre notamment que les invasions biologiques, la surexploitation des espèces et l'agriculture sont les principales menaces qui agissent, de manière indépendantes ou en combinaison, sur la grande majorité des extinctions (85%). Ces menaces restent importantes pour expliquer le risque d'extinction des espèces actuellement menacées (60%). Ces travaux démontrent également l'importance des combinaisons de menaces pour expliquer les patrons d'extinctions et d'espèces menacées (Figure 1c-d).

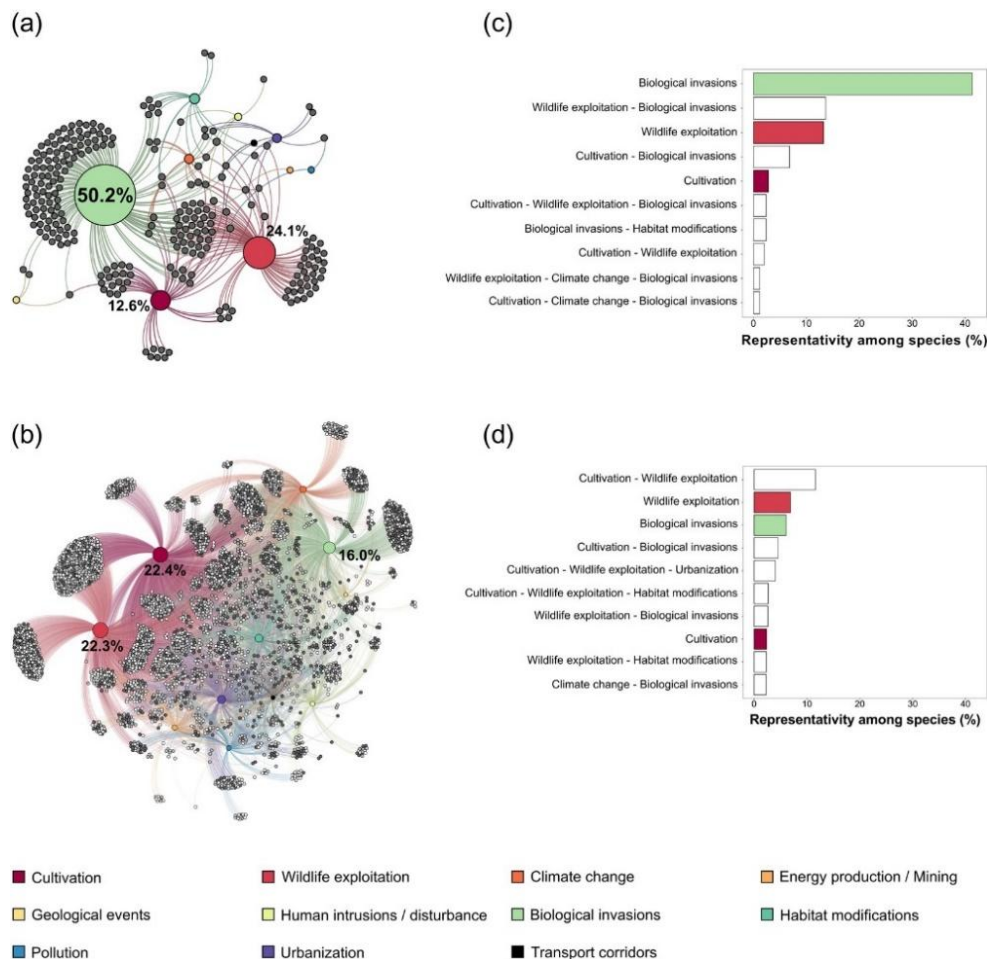


Figure 1 : Représentation des principales associations de menace pour (a) les espèces éteintes, n=249, (b) les espèces actuellement menacées d'extinctions, n=4127. Les histogrammes représentant le top 10 des principales menaces pour les espèces éteintes (c) et menacées (d). Figure de Leclerc et al., 2018

Ce premier article de thèse se focalisait sur une seule facette de la diversité : la diversité taxonomique en faisant l'hypothèse que chaque espèce est équivalente à une autre espèce

pour étudier les menaces des changements globaux. J'ai souhaité poursuivre les travaux effectués en essayant de tenir compte du rôle des espèces et de leurs caractéristiques propres. En effet, les travaux publiés par Devictor *et al.*, (2010) ou encore Brum *et al.*, (2017) ont montré qu'il n'existe pas nécessairement de concordance entre les différentes facettes de la biodiversité à grande échelle. Il semblait donc important de ne pas uniquement s'intéresser au nombre d'espèce mais aussi à la « qualité » de ces espèces en termes de stratégies écologiques qu'elles ont adoptées au sein des écosystèmes. Un des indicateurs permettant de représenter les stratégies écologiques des espèces est la diversité fonctionnelle. Bien que cet indice ne mesure pas directement la fonction des espèces au sein des écosystèmes, il permet de représenter l'ensemble de la diversité des traits des espèces présentes d'un assemblage donné. Dans la suite de ce document, la diversité de traits sera appelée la diversité fonctionnelle pour faciliter la lecture, mais il faut garder à l'esprit qu'il s'agit d'une diversité fonctionnelle au sens large et que cette mesure ne permet pas de décrire les fonctions de l'écosystème au sens strict. Après avoir exploré la littérature sur ce sujet, nous avons souhaité avec Camille Leclerc caractériser les patrons de menaces sur la biodiversité insulaire en tenant compte de la diversité fonctionnelle. Pour se faire, Camille Leclerc a collecté des traits écologiques liés au régime alimentaire, à l'habitat des espèces ou encore à leurs masse pour 2756 espèces insulaires (mammifères et oiseaux) (Leclerc *et al.*, 2020b). Le principal objectif de ce projet était d'étudier à grande échelle la similarité des grands patrons de menaces à travers l'étude de la diversité taxonomique et fonctionnelle. De nombreuses études sur la diversité fonctionnelle menacée par les écosystèmes aquatiques avaient vu le jour dans la littérature scientifique (Mouillot *et al.*, 2014; Toussaint *et al.*, 2016) mais les travaux sur les écosystèmes terrestres s'étaient surtout intéressés à des régions en particuliers ou à certains groupes taxonomiques (e.g., les oiseaux pour lesquels de nombreuses données sont disponibles, Devictor *et al.*, 2010). Afin de mener à bien ce projet, nous avons commencé une collaboration avec Sébastien Villéger (DR CNRS à Marbec) qui est expert des analyses fonctionnelles et qui a développé des fonctions R et des indices spécifiques permettant de représenter les différentes facettes de la diversité fonctionnelle. Les travaux effectués ont permis de confirmer les patrons de menaces observées sur la diversité taxonomique et aussi d'observer une relation linéaire positive entre ces deux facettes. Cependant, la proportion de diversité fonctionnelle menacée est presque trois fois plus élevée (30%) que la proportion de diversité taxonomique (8%) pour les principales menaces telles que la surexploitation des espèces, l'agriculture ou encore les invasions biologiques (Figure 2).

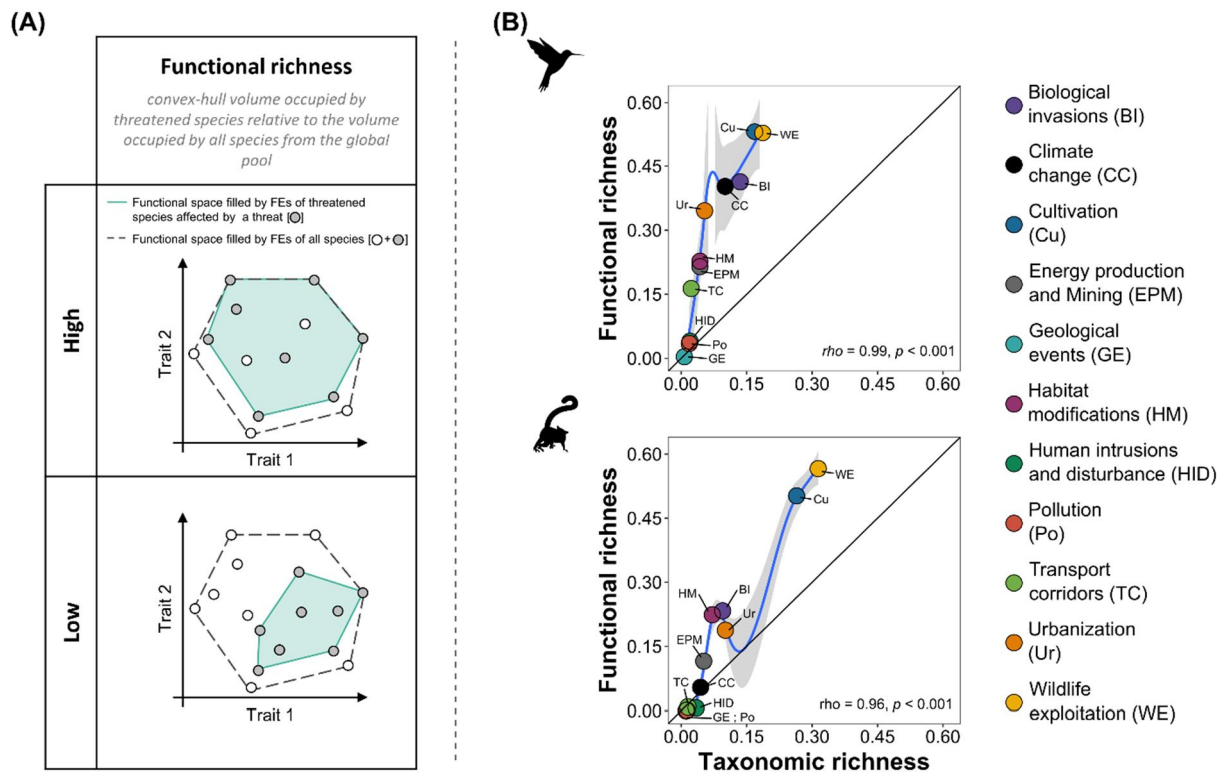


Figure 2 : Relation entre la diversité taxonomique et la diversité fonctionnelle des espèces endémiques insulaires chez les oiseaux (a) et les mammifères (b) menacés à gauche. Chacune des menaces est représentée par un point d'une couleur différente. Une représentation schématique de la richesse fonctionnelle est également présentée à droite de l'image. La richesse fonctionnelle représente le volume de l'espace fonctionnel occupée par les entités fonctionnelles menacées d'extinctions par rapport au volume total. Figure de Leclerc et al., 2020

Une étape supplémentaire des travaux de thèse de Camille Leclerc a été **d'intégrer la diversité phylogénétique et d'étudier la relation entre la diversité phylogénétique et fonctionnelle**. Cette partie s'est développée autour du travail préliminaire mené par Camille Magneville, étudiante en stage de M2, et qui est aujourd'hui en thèse avec Sébastien Villéger. Les analyses préliminaires du stage ont été intégrées au dernier chapitre de thèse de Camille Leclerc, ce qui a permis d'étudier des priorités de conservation au sein des écosystèmes insulaires en tenant compte à la fois des diversités phylogénétique et fonctionnelle mais aussi du réseau d'aires protégées. L'originalité de ces travaux réside à la fois dans la prise en compte des trois facettes de diversité pour identifier des priorités de conservation, mais également de l'utilisation des *Diversity-Area Relationship* pour identifier les régions qui sont plus vulnérables qu'attendu si l'on considère la superficie menacée au sein des îles et archipels. Cette approche a permis de mettre en évidence les **hotspots de vulnérabilité: Madagascar and the Indian Ocean Islands, Mesoamerica and Galápagos Islands, et Wallacea** (Figure 3). Ces travaux ont aussi permis de mettre en évidence les principales menaces qui expliquent les patrons de vulnérabilité pour ces hotspots de vulnérabilité. Ces travaux ont été publiés dans une *special issue* sur les hotspots de diversité dans la revue *Diversity and Distributions*.

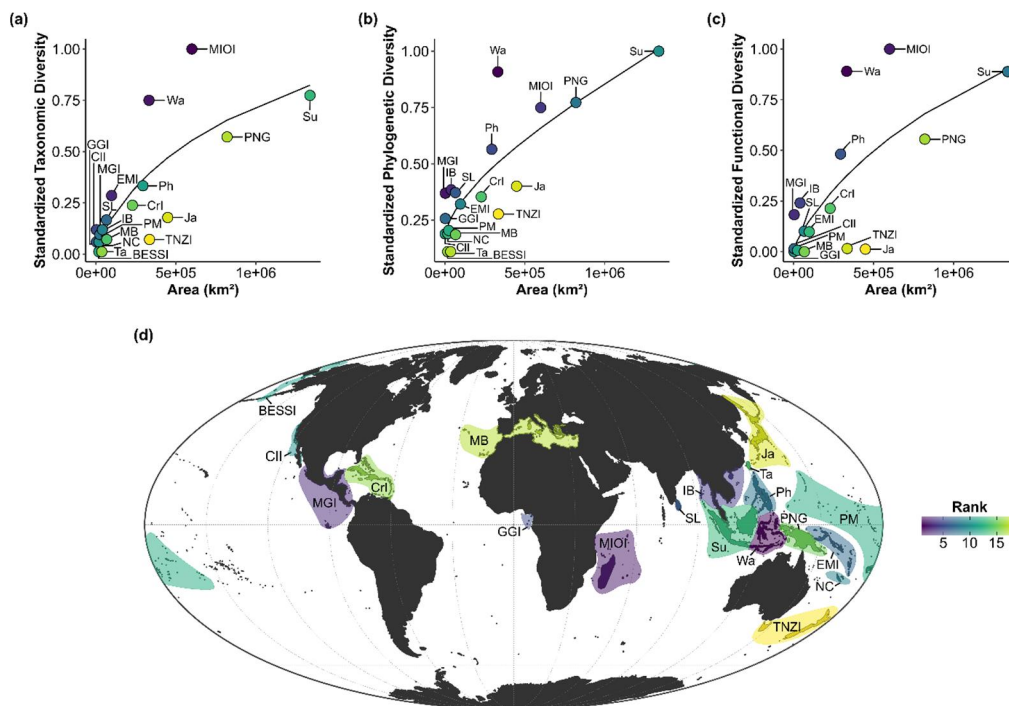


Figure 3 : Diversity-area relationship pour la diversité (a) taxonomique, (b) phylogénétique et (c) fonctionnelle. Une carte des régions insulaires classées selon leurs valeurs de résidus qui indiquent les hotspots (violet) et coldspots (jaune). Figure de Leclerc et al. (2021)

Ces travaux ont permis de faire un premier état des lieux des menaces qui pèsent sur la biodiversité en intégrant davantage de mesures de diversité (taxonomique, puis fonctionnelle puis phylogénétique). Ils permettent dans une certaine mesure d'établir la vulnérabilité des différentes facettes de diversité face aux changements globaux. Néanmoins, ils ne permettent pas d'appréhender la réponse des espèces à ces menaces qui dépend en partie de leur capacité d'adaptation et de leurs sensibilités aux différentes menaces.

En effet, la majorité des études prédictives (e.g., Williams, Jackson & Kutzbach, (2007); Zarei *et al.*, (2020) étudient uniquement l'exposition (*i.e.*, présence d'une intensité de menace plus ou moins forte) d'une région donnée aux changements globaux sans tenir compte des caractéristiques des espèces qui y sont présentes. Afin de mieux comprendre la réponse de la biodiversité aux changements globaux, j'ai souhaité complexifier les approches que j'avais utilisées jusqu'alors (e.g., SDMs, climats analogues) et ainsi mieux appréhender la vulnérabilité des espèces aux changements globaux.

B- Prédictions des impacts des changements globaux

Le concept de vulnérabilité a initialement été introduit par la communauté « climat » au sein des évaluations du GIEC en 2007. A l'époque la vulnérabilité a été définie par trois composantes majeures : l'exposition, la sensibilité, et la capacité adaptative. Pour une espèce donnée, l'exposition est définie comme le changement physique au sein de son environnement. La sensibilité se caractérise par la capacité de l'espèce à persister *in situ* en dépit du stress et la capacité adaptative fait référence à la capacité des espèces à faire face aux effets négatifs du stress. Il faut noter que les indicateurs pouvant servir à définir la sensibilité ou la capacité adaptative sont parfois inter-changés. Par ailleurs, il est possible de mesurer la vulnérabilité à d'autres échelles d'étude (communauté, écosystème, etc.) ce qui

peut amener à considérer de nouveaux indicateurs. Néanmoins, de nombreuses études ont repris le terme de vulnérabilité en étudiant l'une ou plusieurs de ces composantes face aux effets des changements climatiques notamment sur les vertébrés terrestres (Foden *et al.*, 2013; Amecca y Juárez *et al.*, 2014; Pacifici *et al.*, 2015). Un travail de revue mené par de los Ríos, Watson & Butt (2018) sur les travaux de vulnérabilité des espèces aux changements climatiques a permis de mettre en évidence que l'exposition des espèces constituait la principale composante étudiée (n=741 études) alors que la sensibilité ne représentait que 499 études et la capacité adaptative seulement 103 publications. Par ailleurs, seules 58% des publications tenaient compte de deux composantes et à peine 11% considéraient l'ensemble des trois composantes de la vulnérabilité. Ces principaux travaux portaient en grande majorité sur les plantes (n=500) et comptaient seulement 68 publications pour les mammifères, 70 pour les oiseaux, 18 pour les amphibiens et 32 pour les reptiles (de los Ríos *et al.*, 2018).

A partir de ce constat, que j'avais pu identifier dans la littérature, j'ai eu pour objectif d'intégrer au mieux ces différentes composantes pour m'approcher du concept de vulnérabilité des espèces et mieux appréhender la menace des changements globaux sur la biodiversité. **J'ai ainsi complété mes travaux** précédents, en développant un indice spatial de risque qui tenait compte à la fois **de la distribution spatiale des menaces et de leur intensité, mais aussi de la sensibilité des espèces à ces menaces** (Bellard, Leclerc & Courchamp, 2015). Pour cela, j'ai adapté une approche initialement développée pour évaluer les effets cumulés de stress exercés sur les écosystèmes aquatiques (Halpern *et al.*, 2008). En adaptant cet indice, j'ai ainsi pu évaluer les effets spatiaux cumulés de menaces futures, tels que la hausse du niveau des mers, les changements climatiques, les modifications d'habitats (aires urbanisées, l'exploitation minière, prairies, terres cultivées, forêts perturbées, pâturages) et les invasions biologiques aux Etats-Unis. De plus, nous avons utilisé les mesures du risque d'extinction actuel de 196 vertébrés pour quantifier leur sensibilité à ces menaces, c'est-à-dire la richesse spécifique d'espèces déjà identifiées comme sensibles à ces menaces.

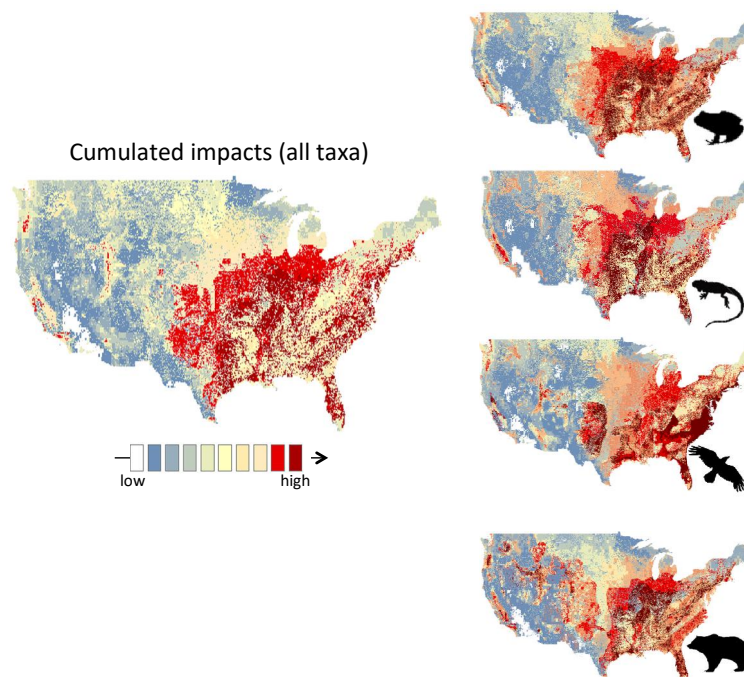


Figure 4 : Distribution spatiale des menaces cumulées (hausse du niveau des mers, changement climatique local, changements d'utilisation des terres, et invasions biologiques) aux Etats-Unis en fonction des différents groupes taxonomiques considérés (amphibiens, oiseaux, mammifères et reptiles). Figure de Bellard *et al.*, 2015

Les résultats sont particulièrement révélateurs puisqu'ils montrent **que les espèces endémiques d'une large moitié de l'est des Etats-Unis risquent d'être vulnérables à plusieurs menaces** d'ici à 2100, en raison de leur exposition à ces menaces et de leurs traits écologiques qui leur confèrent une sensibilité accrue à ces menaces. L'analyse par groupe taxonomique révèle de fortes disparités dans l'ouest du pays notamment pour les mammifères et les oiseaux (Figure 4, Bellard *et al.*, 2015). Ces travaux étaient une première étape pour intégrer la sensibilité des espèces et mesurer un impact cumulé, mais ils ne permettaient pas de tenir compte des capacités d'adaptation ou d'identifier les traits d'histoire de vie des espèces à l'origine de cette sensibilité.

Par la suite et dans le cadre du travail de thèse de Camille Leclerc, nous avons eu pour objectif d'intégrer la notion de vulnérabilité à ces travaux en tenant compte de différents indices de sensibilité des espèces aux changements climatiques mais aussi en intégrant des **indicateurs de la capacité adaptative des espèces**. Nous avons ainsi analysé pour 873 mammifères insulaires endémiques, **les traits des espèces et de leurs assemblages** (niveau de spécialisation de l'habitat, alimentaire, temps de génération, redondance fonctionnelle) ainsi que **la capacité adaptative de ces assemblages** (isolement géographique, niveau d'aires protégées, taux d'extinctions). Une des originalités de ces travaux a été d'utiliser une approche quantitative de la vulnérabilité afin de s'affranchir de valeurs seuils arbitraires où l'on définit qu'une espèce est vulnérable ou non. Dans les travaux précédents (Bellard *et al.*, 2015), nous avons considéré qu'une espèce était sensible ou non selon son statut UICN (menacée ou non) et la présence d'une des menaces associées à ce risque d'extinction. Dans le cadre de ce nouveau projet, nous nous sommes basés sur un cadre d'étude développé par Parravicini *et al.*, (2014) qui est basé sur un « multi decision theory framework » afin d'obtenir des valeurs de vulnérabilité quantitative échelonnée entre 0 et 1 pour une vulnérabilité maximale (Figure 5). Les résultats montrent que toutes les îles présentent des valeurs de vulnérabilité relativement importantes entre 0.25 (Tasmanie) et 0.67 (Nouvelles-Hébrides) selon les archipels. Les *hotspots* de vulnérabilité sont localisés en Nouvelles-Hébrides, dans l'archipel Bismarck et en Nouvelle-Calédonie. Fait intéressant, les travaux démontrent que considérer la seule exposition aux changements climatiques est insuffisant pour étudier la réponse des espèces. En effet, la capacité adaptative de la biodiversité au sein des archipels et, dans une moindre mesure la sensibilité des espèces, s'avèrent être plus importantes que l'exposition pour expliquer la vulnérabilité observée (Figure 5). Par exemple, **nous avons pu démontrer que les espèces présentant un temps de génération long et dont le régime alimentaire était spécialisé sont deux facteurs prédominants associés à la vulnérabilité aux changements climatiques dans les écosystèmes insulaires** (Leclerc, Courchamp & Bellard, 2020a).

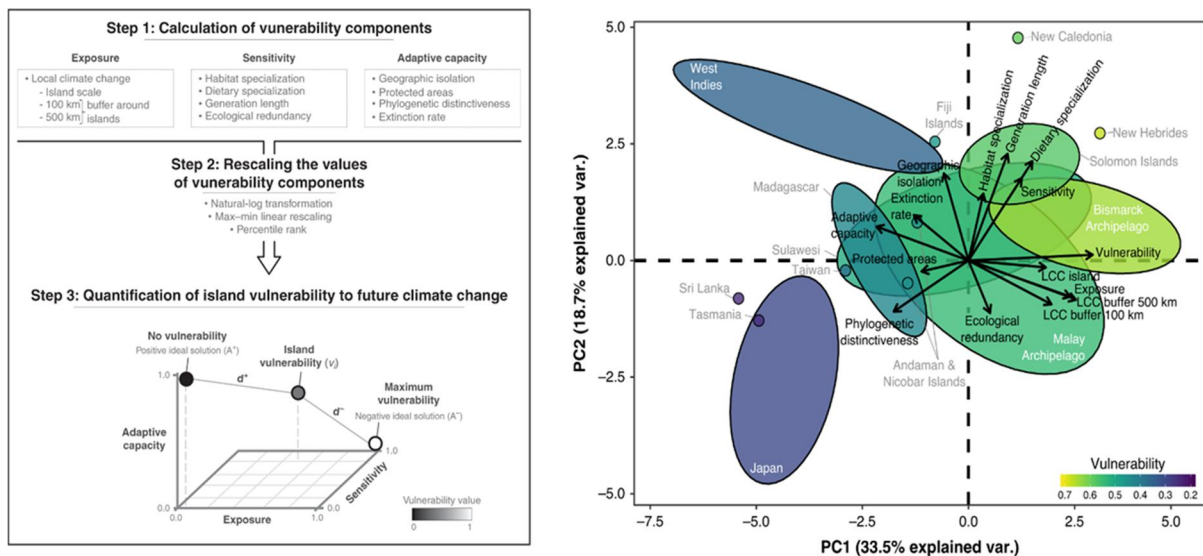


Figure 5 : Illustration des trois différentes étapes pour mesurer la vulnérabilité des mammifères endémiques aux changements climatiques et ACP illustrant les facteurs associés à la vulnérabilité pour les différents archipels représentés par des ellipses (archipels de plus de deux îles) ou des cercles de Leclerc et al. (2020a).

2. Les effets des invasions biologiques sur la biodiversité

A- Conséquences actuelles des invasions biologiques sur les différentes facettes de diversité

Dès 2012 et mon travail avec Franck Courchamp, j'ai développé un axe de recherche sur les invasions biologiques (Bellard *et al.*, 2013a) et en particulier sur les processus liés à leurs impacts qui demeurent encore mal caractérisés à grande échelle. J'ai rédigé en 2014 un projet de financement à la fondation de recherche AXA (obtenu) pour étudier le risque pour la biodiversité du fait de la menace des invasions biologiques à l'*University College of London*.

Durant cette période, j'ai étudié les extinctions contemporaines (depuis 1500) liées aux espèces envahissantes dans les îles et sur les continents, l'un des impacts les mieux documentés à grande échelle. J'ai notamment travaillé avec Tim Blackburn (Prof UCL), afin de mettre en évidence que les espèces envahissantes sont la principale cause d'extinction pour les mammifères, les amphibiens et les reptiles notamment dans les écosystèmes insulaires (Bellard, Cassey & Blackburn, 2016, 780 citations). Dans la continuité de ces travaux nous avons aussi comparé l'importance des espèces envahissantes par rapport aux espèces natives en tant que facteurs d'extinctions (Blackburn, Bellard & Ricciardi, 2019, 148 citations). Ces travaux avait aussi pour but de « réaffirmer » l'importance des espèces envahissantes comme facteur de perte de biodiversité, notamment dans les écosystèmes insulaires (cette étude a été reprise dans *New Scientist* (voir [article](#))).

Au-delà des extinctions globales d'espèces natives, les espèces envahissantes sont aussi responsables de nombreux déclin de populations et de diminution des aires de répartition des espèces natives. Les principaux mécanismes à l'origine de ces conséquences sont les mécanismes d'exploitation (herbivorie, prédation, parasitisme) et les capacités de compétition élevée des espèces exotiques envahissantes. J'ai donc poursuivi la caractérisation des impacts des espèces envahissantes à travers l'étude des vertébrés

menacés par les espèces envahissantes depuis 1900 à l'échelle globale. Cette étude a été menée avec Jonathan Jeschke (Univ. Berlin), expert des invasions biologiques (Bellard, Genovesi & Jeschke, 2016b). La suite de ces travaux a également permis de mettre en évidence une divergence spatiale entre **la distribution des espèces envahissantes et leurs impacts** à grande échelle (Bellard & Jeschke, 2016). En effet, l'impact des espèces envahissantes dépend du taxon que l'on va considérer, du processus d'invasion impliqué (compétition, prédation) mais aussi du contexte local de l'écosystème (Chytrý *et al.*, 2012; Bradley. *et al.*, 2019). Il est donc important de tenir compte à la fois de la distribution des espèces envahissantes et de leurs impacts lors de l'étude des conséquences des invasions biologiques.

Par ailleurs, les écosystèmes insulaires représentent les écosystèmes les plus vulnérables aux invasions biologiques, notamment en termes d'extinctions globales d'espèces. Il m'apparaissait donc important de dédier une partie de mes travaux sur ces écosystèmes. J'ai donc cherché à étudier le lien entre espèces envahissantes et espèces menacées au sein des écosystèmes insulaires et à modéliser des scénarios d'éradication pour l'ensemble des îles et des archipels à l'aide de l'analyse des réseaux. En collaboration avec Jean-François Rysman (Ecole Polytechnique), nous avons développé une approche permettant d'évaluer combien d'espèces pourraient être protégées en fonction de différents scénarios de gestion et d'éradications des espèces envahissantes. A partir des analyses de réseaux et d'indices de modularité, nous avons aussi pu mettre en évidence 21 clusters d'invasions qui démontreraient des profils d'invasions similaires (Figure 6) (Bellard *et al.*, 2017, 76 citations). En plus de mettre en évidence des priorités de gestion pour les écosystèmes insulaires faces aux invasions biologiques, ces travaux ont aussi permis de modéliser différents scénarios d'éradications théoriques afin de maximiser les bénéfices pour la conservation.

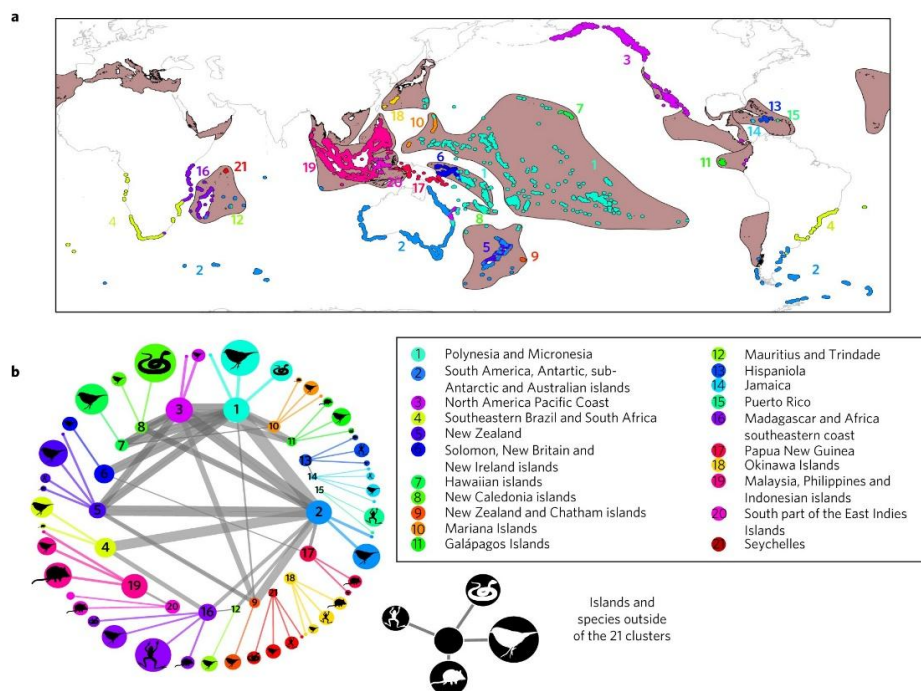


Figure 6 : Carte représentant les localisations des 21 clusters (n=27,081 îles) identifiés comme les *hotspots* d'invasions de Bellard et al., (2017)

Bien que permettant d'analyser le lien entre espèces menacées et espèces envahissantes, ces travaux possédaient certaines limites. Par exemple, il n'était pas possible de faire la distinction entre une espèce menacée dont le rôle écologique est fondamental pour la communauté et une autre espèce menacée qui aurait un rôle plus secondaire. En d'autres termes, dans cette étude nous avons considéré chaque espèce menacée comme des entités au rôle écologique similaire.

Pour la suite des recherches que j'ai menées, j'ai souhaité combiner les outils et approches utilisés dans l'étude des conséquences des changements globaux issus de la thèse de Camille Leclerc pour étudier les **conséquences fonctionnelles et phylogénétiques des espèces envahissantes à l'échelle mondiale sur la biodiversité**. Ces travaux ont illustré que **près de 40% de la diversité fonctionnelle des oiseaux est représentée par des espèces menacées par les invasions biologiques et près de 14% de celle des mammifères** (Figure 7) (Bellard, Bernery & Leclerc, 2021). Il est important de noter que 40% de la diversité fonctionnelle des oiseaux ne va pas nécessairement disparaître car il existe des redondances fonctionnelles. Toutefois, les invasions biologiques menacent une partie importante de cette diversité, probablement en combinaison avec d'autres menaces. Ces résultats sont particulièrement importants car ils permettent de mettre en lumière une facette de diversité encore peu utilisée dans les travaux sur les conséquences des invasions biologiques. Ils permettent aussi de mieux appréhender les profils écologiques qui sont aujourd'hui menacés et risquent de disparaître.

Dans le cadre de cette même étude, nous avons donc cherché à modéliser des scénarios d'extinctions de ces espèces menacées selon différentes probabilités de disparition des populations sur 50 ans. Ces travaux sont les premiers à quantifier globalement les risques de perte de diversité fonctionnelle en raison des invasions biologiques qui atteignent 27% pour les oiseaux et 6% pour les mammifères. Les résultats confirment aussi les récents travaux de Cooke sur les stratégies écologiques qui risquent de disparaître, bien que ces travaux ne se soient pas spécifiquement intéressés à la menace des invasions biologiques (Cooke, Eigenbrod & Bates, 2019). En ce qui concerne la diversité phylogénétique, les scénarios d'extinctions montrent que près de 6% de cette diversité est menacée de disparaître d'ici à 50 ans en raison des invasions. Nous avons pu montrer que les mécanismes à l'origine de cette « perte » potentielle différaient entre les mammifères et les oiseaux, avec une mortalité directe, à travers la prédation, ayant un rôle prépondérant chez les mammifères menacés alors que les impacts sur les écosystèmes ont un rôle bien plus important pour les oiseaux (Figure 7). En analysant plus précisément, les profils écologiques et phylogénétiques de ces espèces, il a été possible d'établir que **les espèces spécialistes d'un ou de deux habitats, qui se nourrissent au niveau du sol avec un régime herbivore pour les mammifères, sont les principales espèces susceptibles de disparaître en raison des invasions biologiques** (Bellard *et al.*, 2021). D'autre part, les oiseaux ayant un régime alimentaire composé plutôt de matière animale, qui se nourrissent à la surface de l'eau et sont de grandes tailles sont les plus vulnérables aux invasions biologiques. Les travaux que nous avons menés montrent par ailleurs que les pertes d'espèces ne se font pas au hasard mais sont surreprésentées au sein de profils similaires (plus regroupées qu'attendu sous un modèle nul de richesse spécifique égale). Par ailleurs, certaines familles de mammifères et d'oiseaux n'ont qu'un ou deux représentants et ceux-ci sont menacés principalement par les invasions biologiques. Ces résultats ont fait l'objet d'un communiqué de presse du CNRS et ont été repris dans de nombreux médias (France inter, [Radio Canada](#), [Reporterre](#), [Science daily](#)). Ces travaux

ont également permis de poser les bases de la thèse de Clara Marino.

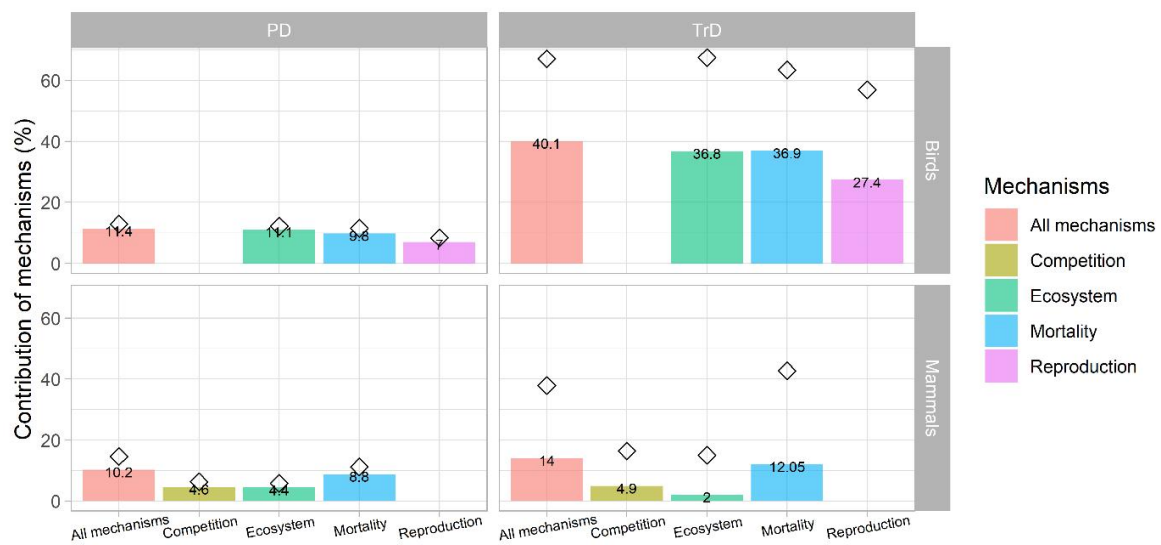


Figure 7 : Pourcentage de diversité phylogénétique (PD) et fonctionnelle (TrD) menacé par les invasions biologiques pour les oiseaux et les mammifères selon les mécanismes d'invasions impliqués, figure de Bellard et al., (2021)

En effet, dans le cadre de ces travaux, nous n'avons pu qu'effleurer les profils écologiques des espèces vulnérables aux invasions biologiques. Par la suite et dans le cadre de la thèse de Clara Marino que j'encadre depuis Septembre 2020, nous avons voulu aller plus loin en étudiant **les profils écologiques de l'ensemble des tétrapodes insulaires menacés par les invasions** (mammifères, oiseaux, lézards et amphibiens) et en analysant conjointement les traits qui confèrent une vulnérabilité universelle aux changements globaux et **les traits qui confèrent une vulnérabilité uniquement dans le contexte des invasions**. Nous avons ainsi analysé les stratégies écologiques de 6015 espèces insulaires qui incluaient deux nouveaux groupes jusqu'alors peu étudiés dans le contexte des invasions biologiques : les lézards et les amphibiens. Les résultats ont permis de mettre en évidence des profils d'espèces universellement menacées (quelle que soit la menace et le groupe taxonomique) : masse corporelle élevée et qui sont spécialisés d'un ou deux types d'habitat. Ces résultats confirment les travaux issus de la littérature sur les changements globaux (Pacifci *et al.*, 2017; Carmona *et al.*, 2021) mais plus intéressant encore, nous avons identifié des **caractéristiques des espèces spécifiquement menacées par les invasions biologiques telles que le développement larvaire pour les amphibiens ou les « foraging niche » terrestres au niveau du sol pour les lézards et les oiseaux (Figure 8)**. Les résultats de ces travaux ont été publié dans la revue *Global Change Biology* (Marino, Leclerc & Bellard, 2022).

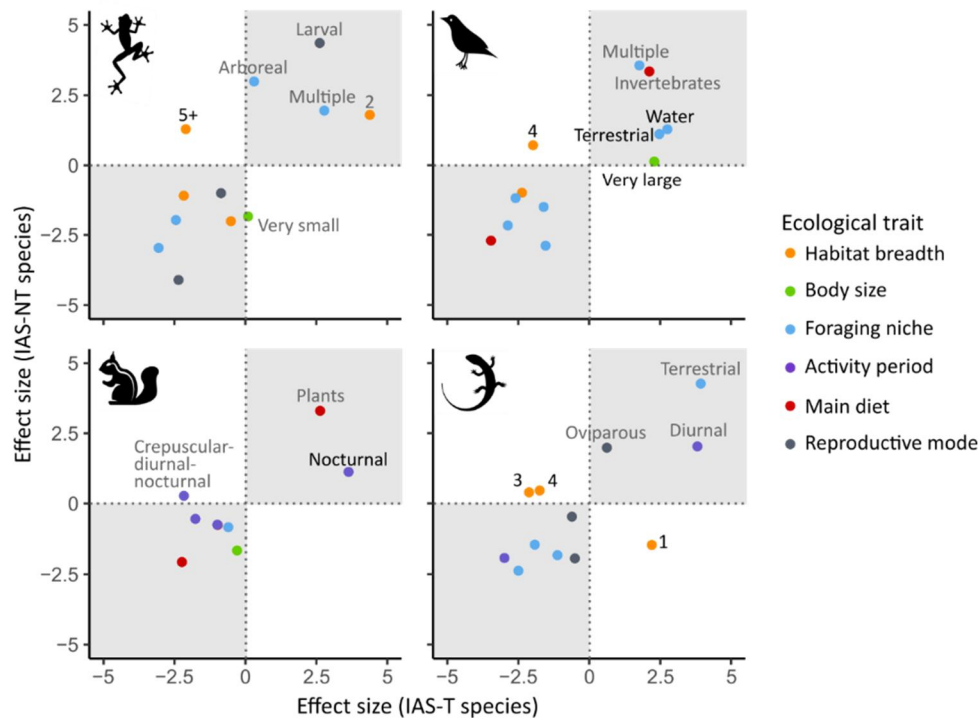


Figure 8 : Comparaison des ES (Effect Sizes) des traits écologiques entre les espèces menacées d’extinctions par les espèces envahissantes et les espèces qui ne sont pas menacées d’extinctions mais exposées aux espèces envahissantes pour l’ensemble des tétrapodes. Les points localisés dans les carrés gris indiquent une tendance similaire entre ces deux groupes, alors que les points situés dans les carrés blancs montrent que la direction des ES entre le groupe des espèces menacées et non menacées sont opposés. Par exemple, les amphibiens non menacés sont plus susceptibles de vivre dans plus de cinq habitats que les amphibiens menacés, figure de Marino, Leclerc & Bellard, (2022)

Ces travaux ont permis d’identifier des caractéristiques qui confèrent une vulnérabilité des espèces natives aux invasions biologiques, mais sans faire de distinction si certains traits sont plus ou moins associés à certains mécanismes d’actions des espèces envahissantes. Par exemple, les travaux de la littérature montrent que les vertébrés de grandes tailles sont plus impactés par la chasse et les vertébrés de petites tailles par la perte d’habitat (Ripple *et al.*, 2017). A partir de ce constat, nous avons fait l’hypothèse que l’impact des espèces envahissantes qui peut être direct (e.g., prédation) ou indirect (e.g., dégradation de l’habitat) conduirait à des profils écologiques vulnérables distincts selon ces mécanismes d’actions. Nous avons donc choisi de compléter les travaux précédents par une étude spécifique sur le groupe des oiseaux qui est actuellement *under review* dans la revue *Global Ecology and Biogeography*. Nous avons intégré une nouvelle base de données de traits morphologiques (taille du bec et caractéristiques des ailes) (Tobias *et al.*, 2021) afin d’étudier à la fois les traits écologiques et morphologiques associés aux mécanismes d’actions des espèces envahissantes. Nous avons ainsi analysé les stratégies écologiques et les caractéristiques morphologiques de près de 850 oiseaux natifs et exotiques. Nous avons aussi pu mettre en évidence que les oiseaux exotiques ayant un fort impact ont majoritairement un régime carnivore et omnivore et une gamme d’habitats beaucoup plus grande que les oiseaux ayant un faible impact sur les communautés envahies. Quant à l’étude des mécanismes d’action impliqués dans les invasions biologiques, elle a permis de montrer que les oiseaux menacés par un effet direct (par exemple lié à la prédation) sont de plus grande taille, avec un bec plus long et se nourrissent principalement à la surface de l’eau en comparaison aux oiseaux

menacés par la perte ou la dégradation de leur habitat. Nous avons profité de ces travaux pour comparer les caractéristiques des oiseaux natifs menacés par les invasions biologiques et des oiseaux exotiques envahissants. Les résultats ont mis en évidence des caractéristiques écologiques et morphologiques bien distinctes entre les oiseaux exotiques et les oiseaux natifs avec un bec plus large, des populations plutôt continentales et de fortes capacités de reproduction pour les oiseaux exotiques et des espèces exclusivement insulaires dont le régime alimentaire se compose principalement de matière animale pour les oiseaux natifs menacés.

Un nouvel objet d'étude : les poissons d'eau douce

Plus récemment et à travers ma participation au projet biodiversa ODYSSEUS (Bernard Huguény IRD, Toulouse), j'ai commencé à travailler sur les poissons d'eau douce pour étudier les patrons d'extinctions et de colonisations dans 71 lacs situés près de la mer Baltique (Bellard, Englund & Huguény, 2019) et de 252 populations situées dans les rivières. Par ailleurs, j'ai poursuivi une collaboration avec Boris Leroy basé au sein de l'UMR aquatique Borea où j'ai aussi effectué mon post doctorat. C'est notamment dans ce cadre que j'ai souhaité développer des travaux sur les invasions biologiques et les poissons d'eau douce. Ainsi depuis Septembre 2019, je co-supervise la thèse de Camille Bernery avec Franck Courchamp (directeur de thèse) et Boris Leroy (co-superviseur de thèse) sur cette thématique. Nous avons ainsi entrepris un travail de revue sur les invasions biologiques des poissons d'eau douce qui documentent à la fois les principaux *pathways* d'invasions ainsi que les traits écologiques et morphologiques qui leurs confèrent un avantage et les principaux impacts et méthodes de gestion. Ce papier est actuellement en révision mineure dans la revue *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* (Bernery *et al.*, 2022a). Ce travail a permis d'identifier les principaux traits écologiques, d'histoire de vie et socio-économiques connus comme influençant les invasions chez les poissons d'eau douce dans la littérature. Camille Bernery travaille actuellement sur des modèles statistiques permettant de **quantifier l'importance relative de ces différents facteurs pour expliquer le succès d'invasion** en tenant compte des différents *pathways* d'introductions des poissons. Ce travail porte sur 840 espèces de poissons d'eau douce et a permis d'extraire des informations pour 14 variables liées au régime alimentaire des poissons, à leur capacité de nage, à leur habitat, aux soins parentaux ou encore aux *pathways* d'introduction de ces espèces. Ces travaux abordent les mêmes questions que les travaux sur les tétrapodes terrestres mais les premiers résultats indiquent des résultats très différents. Nous avons notamment montré que les *pathways* d'introductions et les soins parentaux représentent l'un des principaux facteurs expliquant le succès d'établissement des poissons d'eau douce à la fois lors de l'introduction et de l'établissement des espèces. Par ailleurs, les caractéristiques des poissons envahissant varient selon les *pathways* d'invasions.

B- Intégration des changements climatique dans les scénarios futurs des invasions biologiques

Assez tôt dans ma carrière, j'ai souhaité développer un axe de recherche spécifiquement sur les conséquences des changements climatiques sur les invasions biologiques. Cet intérêt s'est tout d'abord traduit par l'étude de la distribution potentielle d'un échantillon de 99 espèces envahissantes (liste des 100 espèces parmi les pires espèces envahissantes (Lowe *et al.*, 2000)) suite aux effets des changements climatiques à travers l'utilisation des modèles de distribution d'espèces. Dans la littérature de nombreux travaux se sont intéressés aux

nouvelles opportunités d'invasions pour les espèces envahissantes en raison des changements climatiques (Bradley, Oppenheimer & Wilcove, 2009; Walther *et al.*, 2009; Gallardo *et al.*, 2017). Les différents travaux mettent en évidence un déplacement des aires de répartition des espèces envahissantes vers des latitudes plus élevées (e.g., Bellard *et al.*, (2013a) en accord avec ce qui a pu être observés et prédits pour les espèces natives voir Lenoir & Svenning, (2014) et Lenoir *et al.*, (2020)). Cependant, une limite des travaux que j'avais pu mener est de n'avoir considéré qu'un faible échantillon des espèces envahissantes mondiales.

Dès 2016, j'ai eu pour ambition de mieux comprendre les réponses des espèces exotiques envahissantes aux changements climatiques en menant une revue systématique de la littérature. L'objectif initial était d'analyser l'ensemble des réponses des espèces aux effets des changements climatiques à travers différentes approches (expérimentales, observations, et prédictions) et d'étudier si le groupe taxonomique, la région d'origine ou les traits des espèces influençaient leurs réponses. La revue systématique a notamment été faite avec une étudiante de Master (Delphine Ducros), nous avons ainsi extrait l'ensemble des articles qui portaient sur les réponses des espèces exotiques aux changements climatiques (891 articles). Devant l'ampleur de la tâche, nous avons décidé de procéder par étape et dans un premier temps de se concentrer uniquement sur les études de modélisation (69 articles soit 450 cas d'étude). J'ai notamment privilégié les études avec cette approche en raison de mon expertise qui porte principalement sur les travaux de prédiction (e.g., Bellard *et al.* 2013a; González-Muñoz *et al.* 2015). Dans le cadre de cette étude j'ai ainsi pu confirmer les résultats mis en évidence dans le précédent projet notamment avec le déplacement des espèces envahissantes à des latitudes plus élevées et des réponses contrastées selon les groupes taxonomiques. Par exemple, j'ai pu mettre en évidence une diminution de l'aire de distribution des plantes envahissantes en raison des changements climatiques et cela en dépit de leur caractère invasif (Bellard *et al.*, 2018). A terme, je souhaite reprendre l'objectif initial de ces travaux afin (i) d'identifier les biais des études existantes, ii) comparer les réponses des espèces issues des travaux d'observations vs. prédictions et iii) identifier les traits associés aux réponses contrastées observées des espèces envahissantes.

3. Projets en collaboration amenant vers de nouveaux axes de recherche

En parallèle de ces deux grandes thématiques de recherche, j'ai développé des collaborations qui m'ont amenée vers d'autres thématiques au cours des dernières années telles que **l'évaluation de la robustesse des modèles de distribution des espèces (1), le coût économique des espèces envahissantes (2) ou encore les « *culturomics* » dans le cadre des invasions (3).**

- 1- J'ai notamment travaillé en collaboration avec Boris Leroy sur les aspects méthodologiques des modèles de distribution d'espèces qui sont des outils très utilisés dans la prédiction des aires de répartition des espèces. En particulier, j'ai participé au développement du package R *virtual species* (<https://cran.r-project.org/web/packages/virtualspecies/index.html>). Ce *package* a pour but de générer des aires de distributions d'espèces (virtuelles) afin de tester les choix méthodologiques des modèles de distribution (Leroy *et al.*, 2016). Dans ce but, Dr Leroy et moi-même avons encadré un étudiant de Master 2 Recherche (R. Delsol) qui a passé les trois premiers mois au sein de mon laboratoire et les trois suivants au laboratoire du Dr Leroy. Le but de ce stage étant d'analyser les capacités de prédictions des modèles de distribution d'espèces dans un contexte de climats analogue et non

analogue (aucun équivalent statistique de combinaison climatique sur Terre). Les résultats ont montré que la robustesse des modèles de distribution d'espèces est beaucoup plus faible dans le cas de climats non analogues présents au sein de la niche. Ainsi, les modèles de distributions d'espèces vont systématiquement prédire une perte d'aire de répartition des espèces dans ces zones de climats non analogues, non pas car l'espèce n'est pas capable d'y survivre mais uniquement car la combinaison climatique statistique n'aura jamais été rencontrée par le modèle. Ce stage a également fait l'objet d'un développement inattendu sur les métriques d'évaluation des modèles de distribution d'espèces à l'initiative de l'étudiant. En effet, certaines métriques largement utilisées dans la littérature pour évaluer les capacités de prédictions de ces modèles tels que le *True Skill Statistics*, ou encore *l'Area under the Curve* s'avèrent être inappropriées dans certains cas de faible prévalence par exemple. Un article évoquant le problème d'évaluation de ces métriques et proposant une nouvelle métrique basée sur les indices de similarité (Indice de *Jaccard*) ou encore basée sur les seules présence (indice de *Boyce*), plus appropriées et performantes pour évaluer les sorties des modèles de distribution d'espèces basés uniquement sur les présences, a été publié dans le *Journal of Biogeography* (Leroy *et al.*, 2018).

- 2- Dans le cadre de la chaire BNP Paribas sur les invasions biologiques portée par Franck Courchamp, je collabore à l'étude des coûts économiques des espèces envahissantes (Diagne *et al.*, 2021). Dans ce contexte, j'ai participé au workshop INVACOST ce qui m'a permis de développer de nouveaux projets et collaborations. Nous avons ainsi entrepris d'analyser les coûts économiques des espèces envahissantes au sein des écosystèmes insulaires afin d'identifier les principales espèces envahissantes, leurs impacts économiques et le lien potentiel entre les coûts et le statut politique des îles (états insulaires indépendants ou territoires d'outre mers). Ce travail est notamment mené par Thomas Bodey (Univ. Exeter). J'ai aussi participé à l'évaluation du coût des espèces envahissantes de fourmis (Angulo *et al.*, 2022). Plus récemment, j'ai entrepris avec Marine Robuchon (Joint Research Center, European Commission) de quantifier et d'étudier les paradoxes de conservation des espèces envahissantes dont les coûts de gestion sont élevés et qui demandent pourtant des mesures de conservation de par un risque d'extinction élevé dans leurs régions natives. Nous avons aussi étudié l'originalité phylogénétique et fonctionnelle des espèces envahissantes qui pourraient représenter des paradoxes de conservation dans le futur en raison des changements globaux. Les travaux ont été récemment soumis à la revue *Journal of Applied Ecology*.
- 3- La biologie de la conservation et la gestion des espèces envahissantes requièrent l'intégration de la dimension sociétale dans les travaux de recherche. La conservation culturomics et l'iEcology s'intéressent aux interactions entre l'Homme et la Nature et à l'apport des réseaux sociaux et des ressources internet pour l'écologie. Il s'agit d'une discipline nouvelle en Ecologie. Ivan Jarić (Univ. of South Bohemia) a publié de nombreux articles sur l'utilisation de ces données et leurs apports pour l'Ecologie (Jarić *et al.*, 2020; Correia *et al.*, 2021). J'ai été contacté par Ivan pour illustrer les avantages de ce type d'approche afin d'identifier rapidement de nouvelles introductions d'espèces exotiques, et de comprendre la propension du public à accepter ou non la gestion de certaines espèces envahissantes (Jarić *et al.*, 2021). Nous avons ainsi l'attention et la propension des utilisateurs d'internet Français, Allemand, et Anglais aux changements climatiques et aux invasions biologiques (Jarić *et al.*, 2020). Les résultats montrent une propension plus élevée du public à s'intéresser aux thématiques des changements

climatiques qu'à celles des invasions biologiques mais qu'il existe aussi des différences par groupe taxonomique et pays. Par exemple, il existe une attention bien plus élevée pour les espèces envahissantes dans les territoires d'outre-mer qu'en métropole française. Ces projets vont se poursuivre avec une demande de financement qui a été faite (iAqua Project, BiodivRestore call Biodiversa) à laquelle je participe.

III. Projet de recherche et d'encadrements

Contexte

Jusqu'à présent j'ai mené des travaux de recherche portant sur la compréhension des menaces liées aux changements globaux avec une attention particulière sur les menaces des invasions biologiques et du changement climatique. J'ai pour objectif et ambition de poursuivre mes travaux sur trois axes en parallèle.

- Le premier axe aura pour but d'approfondir l'étude des grands patrons de la distribution des espèces envahissantes notamment en revisitant les théories de la biogéographie.
- Le second axe aura pour objectif d'améliorer les scénarios prédictifs de la dynamique des invasions biologiques par (i) l'intégration des caractéristiques qui font le succès des espèces envahissantes et, (ii) des caractéristiques abiotiques des lieux envahis en lien avec le premier axe.
- Le troisième axe aura pour objectif de mieux évaluer les conséquences du changement climatique sur la dynamique des invasions biologiques.

Axe 1 : Poursuite de l'étude des grands patrons de distribution des espèces envahissantes et de leurs principaux « drivers » à travers les théories de la biogéographie insulaire

Il y a 60 ans le travail de MacArthur & Wilson (MacArthur & Wilson, 1963) sur la théorie de la biogéographie insulaire a abouti à la formulation de principes solides permettant d'expliquer la diversité spécifique dans les îles. MacArthur & Wilson (1963) ont montré que la richesse spécifique dans les îles est généralement plus élevée dans les îles de grande superficie (relation aire-espèce) mais également dans les îles proches des continents et les îles qui ont une productivité primaire élevée. En effet, la superficie des îles joue comme un proxy pour la disponibilité en ressource et l'espace disponible, mais aussi comme un indicateur de la diversité des habitats, ce qui contraint les patrons de diversité taxonomique. Les travaux de MacArthur et Wilson ont inspiré de nombreuses études visant à tester leurs hypothèses, à prédire la diversité issue des processus d'extinctions, de spéciations et d'immigrations et appliquer ces modèles au sein des systèmes insulaires (Warren *et al.*, 2015). Cependant, dans un contexte de changements globaux, de nombreuses espèces ont été introduites et d'autres se sont éteintes (Ceballos *et al.*, 2015), ce qui peut amener à modifier l'équilibre de la biogéographie insulaire. Par exemple, avec l'introduction d'espèces envahissantes (colonisation), l'immigration va être initialement plus élevée que l'émigration, ce qui va conduire à une augmentation globale de la diversité taxonomique dans les îles (Sax, Gaines & Brown, 2002; Thomas & Palmer, 2015). De plus, les invasions biologiques sont responsables d'une augmentation des taux d'extinctions, et peuvent ainsi entraîner une diminution de la diversité taxonomique. En outre, **l'isolement géographique** qui conduit à une diversité taxonomique plus faible **pourrait être compensé par un isolement économique fort**. Par exemple, des travaux sur les patrons de diversité des espèces de lézards natifs et exotiques dans les îles caribéennes ont montré que la relation aire-espèce s'était accentuée avec les invasions biologiques alors que la relation isolement géographique-espèce s'est affaiblie, en raison de la contribution humaine (colonisation assistée des espèces exotiques) à la diversité taxonomique (Helmus, Mahler & Losos, 2014). Les travaux d'Helmus illustrent les limites de la théorie de la biogéographie dans un contexte d'invasions biologiques et invite

à explorer plus en profondeur cette question sur un plus grand échantillon d'îles et de taxons mais aussi dans des situations plus nombreuses. D'autres travaux sur la théorie de la biogéographie et les invasions biologiques ont vu le jour, notamment chez les plantes et les oiseaux (Blackburn, Cassey & Lockwood, 2008; Blackburn *et al.*, 2016). Cependant les travaux sur la théorie de la biogéographie insulaire se sont principalement intéressés à la diversité taxonomique des espèces exotiques sans explorer d'autres facettes de diversité (de traits et phylogénétiques).

Par conséquent, **le rôle des facteurs biogéographiques sur les patrons de diversité écologiques et phylogénétiques des communautés dites insulaires envahies reste encore à explorer**. Grâce à l'expertise que j'ai acquise sur les mesures de diversité et les bases de données que nous avons pu compiler et compléter, il me semble aujourd'hui pertinent de développer cette thématique. Par ailleurs, mes travaux combinant à la fois les milieux insulaires au sens strict (et les tétrapodes terrestres) et aussi les bassins versants (et les poissons d'eau douce), ils offrent des perspectives intéressantes pour la compréhension de la biogéographie « insulaire » à partir de ces deux systèmes. Dans la suite de mes travaux, je vais chercher à intégrer à la fois les caractéristiques des espèces qui les rendent vulnérables aux invasions biologiques **ainsi que les caractéristiques abiotiques des environnements envahis, c'est-à-dire m'attacher à mieux comprendre le contexte local des invasions**. Les invasions biologiques représentent des situations privilégiées, quasi expérimentales, ce qui permet le suivi dans des milieux insulaires naturels des perturbations induites. J'ai initié ce champ de recherche en faisant une première demande de financement à la FRB avec Clara Marino pour un financement de sujet de stage qui a commencé en Janvier 2022 avec Yan Descloitres et qui est complété par un stage de Master 1 mené par Lysandre Journiac. A terme, je souhaite obtenir un financement de thèse pour cet axe de recherche (demande de financement de l'école doctorale et appel à projet ANR).

Cette partie aura pour objectif spécifique de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les facteurs abiotiques, biotiques, et humains qui jouent un rôle dans la richesse en espèces exotiques et dans la vulnérabilité des espèces natives aux espèces envahissantes ? Ces facteurs sont-ils les mêmes dans les différentes régions considérées ? Sont-ils les mêmes dans les différents systèmes considérés ?

-La théorie de la biogéographie s'applique-t-elle toujours malgré un contexte de changement global où les invasions biologiques affectent la dynamique de la biodiversité ? Si ce n'est pas le cas quels sont les facteurs (e.g., isolement économique) qui vont dominer et pour quels groupes d'îles ? S'agit-il d'un changement de contexte ? La théorie peut-elle être affinée à la lumière de ces résultats ? Obtenons-nous les mêmes résultats pour les îles et les bassins versants ?

-Est-ce que l'histoire de la colonisation, le développement économique et le commerce entre les îles jouent un rôle important dans ces patrons de distribution ? Dans quelle mesure les diversités écologique et phylogénétique des espèces natives et envahissantes concordent-elles avec les résultats attendus sous la théorie de la biogéographie des îles si on regarde la diversité taxonomique ?

Implication des résultats :

Les résultats de cet axe **permettront de préciser la théorie de la biogéographie dans un monde anthropisé**, afin de mieux appréhender l'effet des facteurs anthropiques, notamment économiques, mais aussi l'effet de la diversité écologique sur la dynamique des invasions. Ces résultats vont également contribuer au débat actuel, dans lequel certains scientifiques suggèrent que les espèces envahissantes, en augmentant la richesse spécifique locale,

peuvent contrebalancer le déclin de la richesse spécifique à l'échelle mondiale (Thomas & Palmer, 2015) ou encore compenser dans une certaine mesure le déclin de la diversité fonctionnelle (Sobral, Lees & Cianciaruso, 2016). En rassemblant et en analysant plusieurs jeux de données (îles, archipels, bassins versants) dans **un même cadre comparatif, nous serons en mesure de distinguer les tendances générales pour les différents groupes taxonomiques (e.g., mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens) et les relations entre la diversité taxonomique et fonctionnelle.**

Axe 2 : Améliorer les scénarios de prédictions concernant la menace des invasions biologiques

Un des autres objectifs importants de mes recherches est de **fournir des scénarios prédictifs des conséquences des invasions biologiques**. L'objectif, à terme, sera de tenir compte au mieux des caractéristiques des espèces exotiques envahissantes (traits écologiques et biologiques), de leurs propensions à envahir de nouveaux habitats et de mieux quantifier leurs conséquences écologiques. C'est un objectif ambitieux auquel je souhaite contribuer dans les années à venir.

De nombreux travaux ont montré l'importance des traits des espèces exotiques pour expliquer leur succès d'introductions, d'établissement, ou d'impact (e.g., mammifères, Capellini *et al.*, (2015), reptiles/amphibiens Allen, Street & Capellini, (2017), oiseaux Evans *et al.*, (2021) (ou encore les poissons (Bernery *et al.*, 2022b), mais les caractéristiques qui expliquent le succès de ces espèces sont en général très peu considérées dans les travaux prédictifs (voir néanmoins Fournier *et al.*, 2019; Schickele *et al.*, 2021). Jusqu'à présent les scénarios de prédictions des espèces envahissantes dans la littérature s'intéressent aux régions géographiques où l'espèce peut trouver des conditions environnementales favorables à sa présence que ce soit à l'échelle d'une seule espèce (Taylor, Kumar & Reid, 2012; González-Muñoz *et al.*, 2015) ou pour plusieurs espèces (Jenkins *et al.*, 2013; Gallardo, 2014; Polaina *et al.*, 2021). La grande majorité des études porte donc uniquement sur l'exposition des habitats à la présence d'espèces envahissantes en s'intéressant par exemple aux *hotspots* d'invasions, là où la richesse en espèces exotiques est élevée (O'Donnell *et al.*, 2012) ou encore aux régions où la présence d'espèces exotiques coïncide avec le réseau d'aires protégées (Li *et al.*, 2016; Gallardo *et al.*, 2017). Il est vrai que les modèles de distribution d'espèces ont offert un outil pertinent pour anticiper les fronts d'invasions (Barbet-Massin *et al.*, 2018). Malheureusement, ils restent aujourd'hui insuffisants pour produire des scénarios d'invasions et estimer les conséquences potentielles de ces invasions car ils n'étudient que l'exposition qui n'est pas un indicateur suffisant pour quantifier l'impact.

Ces travaux n'intègrent ainsi pas d'autres composantes du succès d'invasions tels que les traits des espèces introduites, les caractéristiques des zones envahies ou encore leurs probabilités d'introductions. C'est pourtant le contexte local qui explique majoritairement l'impact des espèces envahissantes. L'objectif de cet axe sera donc de **modéliser des scénarios d'invasions dans un contexte (ou non) de changement climatique** en proposant de complexifier les approches actuelles (e.g., Bellard *et al.*, (2013b, 2016c); González-Muñoz *et al.*, (2015)). Par exemple, les travaux de thèse de Clara Marino et de Camille Bernery ont pour but de proposer des scénarios d'invasions des espèces envahissantes (vertébrés terrestres et aquatiques) **en tenant compte des traits écologiques**

et morphologiques des espèces liés à leurs succès d'établissement. Dans le cadre des travaux de thèse de Camille Bernery (Bernery *et al.*, 2022b), nous avons identifié les traits écologiques et caractéristiques économiques (« pathways ») des espèces qui sont associées à leurs succès d'établissements et à leurs impacts. Forts de ces travaux sur les poissons exotiques, nous souhaiterions proposer un cadre d'étude permettant de tenir compte à la fois des traits des espèces qui leurs donnent un avantage pour s'établir dans de nombreux pays, ainsi que les conditions favorables présentes dans les bassins versants. Ces travaux sont actuellement en cours de conceptualisation et feront l'objet d'un nouveau chapitre dans le travail de thèse de Camille Bernery.

En parallèle, les travaux que nous avons menés sur les tétrapodes terrestres ont eu pour objectif d'étudier à la fois les caractéristiques des espèces exotiques envahissantes qui leurs confèrent un avantage dans un contexte d'invasions biologiques (Marino & Bellard, 2022) et les traits des espèces natives qui entraînent une sensibilité aux espèces envahissantes (Leclerc *et al.*, 2020b; Bellard *et al.*, 2021; Marino *et al.*, 2022). L'idée de ce projet est de proposer des scénarios de vulnérabilité des espèces envahissantes aux invasions biologiques en considérant trois composantes : l'exposition aux espèces envahissantes (à travers des modèles de distribution d'espèces exotiques), la sensibilité des espèces aux invasions (traits écologiques et biologiques tels que le niveau de spécialisation, le temps de génération, ou encore la masse corporelle), et la capacité adaptative des espèces (e.g., taille de population, réseau d'aires protégées disponibles). Nous souhaitons mettre en place différentes métriques pour chacune de ces composantes afin de mesurer des valeurs de vulnérabilité et proposer des scénarios d'invasions. Ce projet est également à l'étape de conceptualisation et représentera un chapitre de thèse de Clara Marino. Les travaux présentés ci-dessus seront pour nous une première étape pour mieux appréhender les scénarios des espèces envahissantes dans des travaux prédictifs. L'objectif à plus long terme est d'intégrer les relations biotiques entre espèces envahissantes et espèces natives **afin de mieux évaluer les conséquences potentielles de ces espèces envahissantes en les modélisant de manière explicite.**

En effet, en dépit des nombreux progrès qui ont été accomplis ces dernières années pour prédire les risques d'invasions (Jeschke & Strayer, 2008), la grande majorité des travaux de prédictions actuels ignorent les relations biotiques, et leurs rôles majeurs dans les mécanismes d'invasions (Araújo & Luoto, 2007; Heikkinen *et al.*, 2007). Les travaux prédictifs font aujourd'hui l'hypothèse qu'à grande échelle, le climat est le principal facteur régissant la distribution des espèces. Or d'autres études ont démontré au contraire qu'à grandes échelles, notamment régionales, les relations biotiques étaient également un facteur limitant la distribution des espèces (Gotelli, Graves & Rahbek, 2010; Gaüzère *et al.*, 2022). Les récents développements des modèles de distribution d'espèces permettent dans une certaine mesure de modéliser la co-occurrence d'espèces (Pollock *et al.*, 2014; Tikhonov *et al.*, 2017) mais ne permettent pas directement de modéliser les relations biotiques entre les espèces. Le risque associé aux invasions biologiques est donc, à l'heure actuelle uniquement modélisé comme une fonction de l'aire de distribution des espèces envahissantes et de leurs richesses spécifiques (exposition aux risques d'invasions) ainsi que le recouvrement avec les espèces natives. **Or, en fonction des espèces envahissantes qui vont être introduites et de leur rôle en tant que prédateur, compétiteur ou parasite les conséquences pour la biodiversité peuvent être très différentes, c'est pourquoi il est primordial de tenir compte de ces relations biotiques de manière plus explicite.**

Au cours des dernières années, des équipes de recherche ont essayé de tenir compte des interactions biotiques dans les modèles de distributions d'espèces en se basant sur la corrélation spatiale des espèces ou sur le nombre maximal d'espèces qu'un écosystème peut supporter (Guisan & Rahbek, 2011; Morueta-Holme et al., 2016) mais sans tenir compte explicitement de ces relations biotiques notamment en raison de la difficulté à trouver des données précises sur les relations biotiques pour un grand nombre d'espèces et du manque d'un cadre conceptuel clair. Deux études pionnières ont attiré mon attention et me semblent être des pistes prometteuses pour intégrer les relations biotiques de manière explicite dans les travaux de prédiction. Tout d'abord l'étude de Staniczenko *et al.*, (2017) propose de combiner les réseaux bayésiens et les modèles de distribution d'espèces pour modéliser les relations biotiques au sein d'une communauté végétale. A partir de données de co-occurrences, le modèle proposé par P. Staniczenko tend à représenter fidèlement les relations biotiques et montrent un potentiel prédictif plus élevé que les modèles traditionnels de distribution d'espèces. Ces travaux ont été mené par P. Staniczenko (expert des réseaux bayésiens, aujourd'hui au SESYNC, USA) avec qui j'ai eu l'occasion de collaborer lors de mon séjour postdoctoral à Londres. Une collaboration avec son groupe permettrait d'appliquer cette approche aux invasions biologiques. D'autre part, le cadre d'étude développé par Morales-Castilla *et al.*, (2015) offre une perspective intéressante pour identifier les principales relations biotiques d'un système en filtrant par étapes successives les relations biotiques les plus probables selon les règles de co-occurrences, les groupes trophiques ou encore les relations masse prédateur-proie.

A mon sens, ces deux études offrent des perspectives intéressantes qui peuvent être appliquées à la thématique des invasions biologiques pour modéliser les relations biotiques entre espèces envahissantes et espèces menacées. Par ailleurs, l'essor du *machine learning* et du *deep learning*, procure de nouvelles perspectives pour inférer les relations biotiques à partir de données de co-occurrences et d'informations biologiques et écologiques sur les espèces. A moyen terme, je souhaite me former à ces techniques pour pouvoir faire une demande de financement de projet de recherche dans ce sens. Je suis convaincue qu'il sera possible **d'évaluer l'impact de l'introduction de nouvelles espèces envahissantes sur les relations interspécifiques** et les communautés natives. Cette partie, particulièrement complexe nécessitera donc un financement important tel que celui de l'ANR (échec de la pré-proposition à l'appel 2021-2022).

Cette partie aura pour objectif spécifique de répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que l'intégration des traits écologiques, biologiques, permet de mieux prédire la distribution des espèces exotiques établies (en comparaison aux travaux basés uniquement sur les SDMs)?
- Quels sont les « hotspots » d'invasions pour les poissons d'eau douces et les tétrapodes terrestres lorsque l'on intègre les caractéristiques écologiques des espèces ?
- L'exposition aux espèces exotiques est-elle un bon indicateur de l'impact des invasions, lorsque l'on considère les traits biologiques et écologiques des espèces introduites et natives ?
- Existe-t-il une congruence spatiale entre l'exposition, la sensibilité et la capacité adaptative aux espèces exotiques envahissantes ?
- Dans quelle mesure ces informations permettent-elles de guider les programmes de

conservation/gestion des espèces envahissantes ?

-Est-il possible de mieux quantifier les conséquences des invasions biologiques en intégrant les relations biotiques (prédation et de compétition) dans les scénarios d'invasions ?

-Est-il possible d'intégrer les relations biotiques notamment de prédation et de compétition pour mieux prédire les conséquences des invasions biologiques ?

Implication des résultats :

La combinaison de plusieurs indicateurs liés aux invasions biologiques (exposition aux espèces envahissantes, traits associés aux succès d'invasions, sensibilité des espèces natives, capacités adaptatives, et les relations biotiques) qui sont associés à l'établissement des espèces exotiques et à leur impact sont des étapes clés pour mieux prédire la dynamique des invasions. Il sera possible d'établir des cartes de risques d'invasions biologiques selon différents degrés de vulnérabilité du milieu en fonction des caractéristiques des espèces exotiques et des espèces natives qui s'y abritent. Par ailleurs, **l'intégration des relations biotiques notamment d'exploitation et de compétition** pour prédire la dynamique de la biodiversité n'a pas encore été réalisée et permettra de franchir une nouvelle étape importante dans les travaux prédictifs. Cela devrait ouvrir de nouveaux horizons dans ce champ disciplinaire et permettre une meilleure **compréhension du rôle des espèces envahissantes dans la dynamique insulaire**. En outre, la menace des invasions biologiques est souvent combinée à d'autres menaces tels que la perte d'habitat ou la surexploitation des espèces, ce qui entraîne des pertes pour la biodiversité bien plus importante que sous l'effet d'une seule menace. Cette question a été récemment explorée par Pol Capdevilla qui montre que la majorité des interactions de menaces avec les invasions biologiques entraîne des effets antagonistes (pers. comm. Capdevilla in prep). Il est donc primordial de pouvoir davantage explorer ces interactions et de comprendre quels sont les mécanismes derrière ces réponses. C'est dans ce contexte que je souhaite relancer cette thématique sur les interactions entre le changement climatique et les invasions biologiques que je n'ai pas pu, faute de financement, développer ces dernières années.

Axe 3 : Interactions entre les changements climatiques et les invasions biologiques

Les changements climatiques conduisent à une modification de la distribution et de l'intensité de la menace des invasions biologiques. En théorie, les changements climatiques peuvent altérer les différentes étapes du processus d'invasion, depuis l'introduction des espèces exotiques (en dehors de leur aire native) jusqu'à leur survie et établissement, mais aussi leur expansion et leur impact sur les communautés natives (Hellmann *et al.*, 2008)

Les récents travaux de méta-analyses sur des données empiriques menés par Sorte *et al.*, (2010) dans les écosystèmes marins montrent (i) que les taux d'expansion des espèces exotiques sont bien plus élevés que ceux des espèces natives et (ii) les déplacements sont aussi plus importants pour les espèces marines que terrestres (en raison des barrières physiques terrestres) (Sorte, Williams & Carlton, 2010). Une étude sur les plantes en Californie documente que 27% des plantes introduites (vs. 12% pour les plantes endémiques) ont montré un déplacement vers des altitudes plus élevées afin de suivre les isothermes climatiques (Wolf *et al.*, 2016). Les travaux de Dainese *et al.*, (2017) sur la réponse des plantes aux changements climatiques dans les Alpes ont aussi mis en évidence que la vitesse de

déplacement des espèces exotiques est deux fois plus élevée que celles des espèces natives. Plus récemment encore, les travaux de Lenoir *et al.*, (2020) illustrent les déplacements observés de différents taxons terrestres et marins à l'échelle globale à partir de la base de données BioShifts compilant 30,534 déplacements. L'ensemble des travaux ont permis de mettre l'accent sur les déplacements d'espèces en raison du changement climatique, mais aucune étude globale n'a étudié les déplacements ou non des espèces exotiques à grande échelle pour plusieurs groupes taxonomiques.

Un des projets à moyen terme que je souhaite développer en collaboration avec Jonathan Lenoir et Lise Comte (qui sont à l'origine des travaux sur BioShifts) serait de **développer une base de données** similaire spécifiquement sur le **déplacement des espèces exotiques**. Dans ce cadre, nous envisageons une demande de financement ainsi que le co-encadrement d'un étudiant en master pour entreprendre ce projet. Cette nouvelle collaboration offrirait des perspectives très intéressantes pour l'ensemble de la communauté pour étudier la réponse des espèces exotiques aux changements climatiques et aux changements d'usage des sols. En utilisant une approche standardisée, il s'agira de poser les fondations d'un projet collaboratif et ouvert à la communauté pour aborder la question des interactions entre le changement climatique et les invasions biologiques. Cette partie permettrait notamment d'identifier si le statut natif ou introduit, l'origine géographique, les caractéristiques écologiques (et économiques) ou encore de l'aire de distribution expliquent les déplacements observés et dans quelle mesure certaines caractéristiques sont prépondérantes.

Une deuxième approche sera de modéliser la réponse des espèces aux changements climatiques en utilisant les modèles de distribution d'espèces. Le travail bibliographique que j'ai mené il y a quelques années sur les effets des changements climatiques sur la distribution spatiale des espèces envahissantes (71 publications : n=464 espèces) a mis en évidence des **réponses contrastées** de ces dernières selon l'échelle spatiale et le groupe taxonomique étudiés. Par exemple, alors que les plantes envahissantes tendent à subir une diminution de leur aire de répartition en raison du changement climatique, la distribution spatiale des invertébrés envahissants pourrait être favorisée par ce dernier (Bellard *et al.*, 2018). Au sein des groupes taxonomiques, il existe des disparités de réponses que je n'ai pas eu l'occasion d'étudier davantage. Par ailleurs, les travaux prédictifs liés aux invasions biologiques s'intéressent principalement aux espèces envahissantes sans étudier les conséquences des changements climatiques pour les espèces natives menacées par les espèces envahissantes. Dans le cadre de cet axe, je souhaiterais aussi étudier **l'effet des changements climatiques sur la distribution des « couples » des espèces natives et exotiques au travers des modèles de distribution d'espèces**. L'objectif ici est d'étudier les effets potentiels des changements climatiques sur la distribution spatiale des espèces envahissantes et natives en particulier dans les habitats insulaires où les impacts sont les plus marqués afin de pouvoir comparer les réponses. En intégrant ici les effets du changement climatique sur la distribution de ces deux groupes d'espèces, il sera possible d'identifier les potentielles réorganisations de distribution d'espèces qui vont s'opérer à grande échelle (e.g., recouvrement des aires de distribution qui peut être altéré, arrivée de nouvelles espèces exotiques ou natives, etc ...). Cette partie permettra également d'apporter une dimension nouvelle, fonctionnelle, aux travaux macro-écologiques prédictifs des risques liés aux invasions biologiques en analysant les conséquences pour la dimension fonctionnelle des réorganisation d'espèces au sein des assemblages des communautés insulaires. Un des défis méthodologiques de cette partie portera sur les données climatiques des îles et sur les occurrences des espèces endémiques qui sont souvent en faible nombre, et qui pourrait impliquer d'appliquer des méthodes

spécifiquement développées pour les espèces à faible répartition d'espèces (Fois *et al.*, 2018). Cette partie se fera notamment avec l'aide de Boris Leroy, expert des SDMs. Cette partie aura pour objectif spécifique de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la vitesse de déplacement des espèces exotiques envahissantes par rapport aux espèces natives ? Sont-elles en retard par rapport aux isothermes climatiques ?
- Les facteurs humains (densité de populations, zones urbaines) contribuent-ils à observer des déplacements accrus par rapport à des zones où la biodiversité est protégée ?
- Les « couples » actuels espèces menacées-espèces envahissantes vont-ils « perdurer » dans le temps où sont-ils amenés à disparaître en raison du changement climatique ?
- Est-ce que les espèces exotiques avec des traits avantageux pour les invasions sont aussi les espèces qui pourraient profiter du changement climatique ?
- Les prédictions de déplacements des combinaisons espèces natives-envahissantes en raison du changement climatique vont-elles conduire à des réorganisations de la distribution des espèces ?

Implication des résultats :

La comparaison des prédictions et des observations actuelles (e.g., bioshifts) permettra de mieux quantifier le retard de déplacement éventuel des espèces face aux changements climatiques par rapport aux isothermes climatiques et à terme de les intégrer dans les modèles de distribution d'espèces. Par ailleurs, les travaux que je propose dans cet axe ont pour but de mieux caractériser les impacts des invasions biologiques dans un contexte de changement climatique. En outre, une hypothèse majeure sur la relation entre les changements climatiques et les invasions biologiques est que les changements climatiques vont permettre de favoriser l'expansion de l'aire de distribution des espèces envahissantes par rapport aux espèces natives. Ces travaux permettront d'apporter de nouveaux éléments de réponse à ces questions, et principalement de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse principale. Par ailleurs, il sera possible de mieux comprendre les caractéristiques écologiques qui favorisent ou au contraire limitent les déplacements d'aires de distribution des espèces.

Projets de collaborations

En parallèle de ces trois grands axes de recherche, je poursuis deux grands projets qui s'inscrivent dans une dynamique de collaboration importante.

Tout d'abord, je travaille avec Liu Chunlong qui est professeur au laboratoire des invasions biologiques et de l'évolution adaptative de Wuhan sur le projet (« InvAbun ») qui a pour but de créer une base de données d'abondance et de densité des espèces exotiques au sein de leur aire native et exotique à travers le monde. Ce projet est aussi mené avec Jonathan Jeschke, Franck Courchamp et Hanno Seebens et il aura pour ambition d'intégrer d'autres chercheurs une fois la base de données enrichie, notamment à travers des demandes de financements de workshop. La base de données permettra d'étudier (i) les mécanismes expliquant les différences d'abondances entre l'aire native et les aires introduites, et (ii) de comparer l'évolution de la dynamique de populations après des événements d'introduction.

Un second projet, intitulé RIVAGE, dont l'aspect collaboratif est particulièrement important a

été déposé au CESAB par Daniel Kissling et moi-même en tant que porteurs du projet. Le but du projet RIVAGE est de compiler les bases de données de la vulnérabilité des îles aux changements globaux pour les oiseaux, les plantes et les mammifères afin de déterminer la congruence des menaces pour les différentes facettes de diversité et de proposer des priorités de conservation parmi les îles selon différents scénarios de conservation. Ce projet déposé en mai 2022 propose le financement d'un chercheur post-doctorant pour deux années ainsi que deux workshops par an pendant 3 ans avec différents experts de la vulnérabilité, de la biogéographie insulaire, des changements globaux et plus largement de la conservation, issus de huit pays différents et qui ont tous acceptés d'être partenaire du projet : A. Benitez, N. Butt, A. Pauchard, A. Schipper, C. Leclerc, F. Rigal, W. Foden, P. Capdevilla, J. Lenoir, J M Fernandez-Palacios et Y. Soubeyran.

4. Conclusion

En conclusion, les différents axes de recherche que je souhaite mener aboutiront à une meilleure compréhension et modélisation de la dynamique des invasions biologiques dans un contexte de changements globaux. A travers la théorie de la biogéographie, je souhaite à moyen terme intégrer les composantes liées aux invasions biologiques dans les modèles théoriques et tester empiriquement ces modèles. Mes recherches auront également pour but d'intégrer les différentes facettes de la biodiversité c'est-à-dire taxonomique, fonctionnelle et phylogénétique pour mieux scénariser les conséquences des invasions biologiques à l'échelle macroécologique. Je souhaite aussi poursuivre mes travaux sur les interactions entre le changement climatique et les invasions biologiques afin de mieux comprendre les réponses spatiales des espèces et comment la biodiversité pourrait se réorganiser dans les prochaines décennies. En outre, les différents axes de recherche proposés s'inscrivent dans un domaine de recherche particulièrement actif, dont les productions récentes soulignent l'importance d'intégrer les interactions biotiques (Gaüzère *et al.*, 2022) et l'ensemble des composantes des changements globaux dans les évaluations de la biodiversité.

Enfin, l'amélioration des scénarios de prédiction des invasions biologiques à travers l'intégration des relations biotiques représente un défi majeur de mes recherches que je souhaite relever grâce à un investissement en temps et en personnel important au cours des années à venir. Au fil de mon parcours, j'ai découvert que ma passion pour la recherche sur les changements globaux va au-delà du fait de mener moi-même ces recherches : encadrer et pousser de jeunes chercheurs à développer leurs propres réflexions et questions est tout aussi gratifiant, voire davantage quand il permet d'insuffler des dynamiques nouvelles dans un projet et dans la vie de laboratoire. Ces dernières années ont été l'occasion d'apprendre beaucoup sur la manière de mener la recherche et d'encadrer des jeunes chercheurs. J'ai appris à accepter les échecs, à m'adapter aux situations et persévérer afin d'améliorer les projets et ma façon de travailler. À titre d'exemple, j'ai appris à identifier plus rapidement les points forts et faibles des étudiants et à poser les bonnes questions pour permettre un bon déroulement de l'encadrement. J'ai également essayé de m'adapter à différentes façons d'enseigner la recherche selon les profils des étudiants. Par ailleurs, j'ai progressivement appris à dire « non » aux propositions et opportunités intéressantes, afin de me laisser suffisamment de temps et de recul pour orienter au mieux ma recherche, pour mener mes propres projets et ne pas être en flux tendu en permanence. Plus globalement, l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches traduirait une reconnaissance de ma capacité à encadrer et superviser de jeunes chercheurs et à maîtriser une stratégie à long terme des travaux de recherche. C'est dans ce contexte et sur ces critères que j'ai souhaité rédiger mon HDR et que je présente ma candidature.

IV. Références

- Allen W.L., Street S.E. & Capellini I. (2017) Fast life history traits promote invasion success in amphibians and reptiles. *Ecology Letters* **20**, 222–230.
- Ameca y Juárez E.I., Mace G.M., Cowlshaw G. & Pettorelli N. (2014) Identifying species' characteristics associated with natural population die-offs in mammals. *Animal Conservation* **17**, 35–43.
- Angulo E., Hoffmann B.D., Ballesteros-Mejia L., Taheri A., Balzani P., Bang A., *et al.* (2022) Economic costs of invasive alien ants worldwide. *Biological Invasions*.
- Araújo M.B. & Luoto M. (2007) The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography* **16**, 743–753.
- Barbet-Massin M., Rome Q., Villemant C. & Courchamp F. (2018) Can species distribution models really predict the expansion of invasive species? *PLOS ONE* **13**, e0193085.
- Bellard C., Bernery C. & Leclerc C. (2021) Looming extinctions due to invasive species: Irreversible loss of ecological strategy and evolutionary history. *Global Change Biology* **27**, 4967–497.
- Bellard C., Bertelsmeier C., Leadley P., Thuiller W. & Courchamp F. (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters* **15**, 365–377.
- Bellard C., Cassey P. & Blackburn T.M. (2016a) Alien species as a driver of recent extinctions. *Biology Letters* **12**, 20150623.
- Bellard C., Englund G. & Hugueny B. (2019) Biotic and abiotic drivers of species loss rate in isolated lakes. *Journal of Animal Ecology* **88**, 881–891.
- Bellard C., Genovesi P. & Jeschke J.M. (2016b) Global patterns in threats to vertebrates by biological invasions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **283**, 20152454.
- Bellard C. & Jeschke J.M. (2016) A spatial mismatch between invader impacts and research publications. *Conservation Biology* **30**, 230–232.
- Bellard C., Jeschke J.M., Leroy B. & Mace G.M. (2018) Insights from modeling studies on how climate change affects invasive alien species geography. *Ecology and Evolution* **8**, 5688–5700.
- Bellard C., Leclerc C. & Courchamp F. (2015) Combined impacts of global changes on biodiversity across the USA. *Scientific Reports* **5**, 11828.
- Bellard C., Leclerc C., Leroy B., Bakkenes M., Veloz S., Thuiller W., *et al.* (2014) Vulnerability of biodiversity hotspots to global change. *Global Ecology and Biogeography* **23**, 1376–1386.
- Bellard C., Leroy B., Thuiller W., Rysman J.-F. & Courchamp F. (2016c) Major drivers of invasion risks throughout the world. *Ecosphere* **7**, 1–14.
- Bellard C., Rysman J.-F., Leroy B., Claud C. & Mace G.M. (2017) A global picture of biological invasion threat on islands. *Nature Ecology & Evolution* **1**, 1862–1869.
- Bellard C., Thuiller W., Leroy B., Genovesi P., Bakkenes M. & Courchamp F. (2013a) Will climate change promote future invasions? *Global change biology* **19**, 3740–3748.
- Bellard C., Thuiller W., Leroy B., Genovesi P., Bakkenes M. & Courchamp F. (2013b) Will climate change promote future invasions? *Global Change Biology* **19**, 3740–3748.

- Bernery C., Bellard C., Courchamp F., Brosse S., Gozlan R.E., Jarić I., *et al.* (2022a) Freshwater fish invasions: A comprehensive review.
- Bernery C., Bellard C.A., Courchamp F., Brosse S. & Leroy B. (2022b) Important characteristics determining the success of nonnative freshwater fish introduction, establishment, and impact.
- Blackburn T.M., Bellard C. & Ricciardi A. (2019) Alien versus native species as drivers of recent extinctions. *Frontiers in Ecology and the Environment* **17**, 203–207.
- Blackburn T.M., Cassey P. & Lockwood J.L. (2008) The island biogeography of exotic bird species. *Global Ecology and Biogeography* **17**, 246–251.
- Blackburn T.M., Delean S., Pyšek P. & Cassey P. (2016) On the island biogeography of aliens: a global analysis of the richness of plant and bird species on oceanic islands. *Global Ecology and Biogeography* **25**, 859–868.
- Bradley B.A., Laginhas Brittany B., Whitlock R., Allen Jenica M., Bates A.E., Bernatchez G., *et al.* (2019) Disentangling the abundance–impact relationship for invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **116**, 9919–9924.
- Bradley B. a., Oppenheimer M. & Wilcove D.S. (2009) Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead? *Global Change Biology* **15**, 1511–1521.
- Brum F.T., Graham C.H., Costa G.C., Hedges S.B., Penone C., Radeloff V.C., *et al.* (2017) Global priorities for conservation across multiple dimensions of mammalian diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **114**, 7641–7646.
- Capellini I., Baker J., Allen W., Street S. & Venditti C. (2015) The role of life history traits in mammalian invasion success. *Ecology letters* **18**, 1099–1107.
- Carmona C.P., Tamme R., Pärtel M., De Bello F., Brosse S., Capdevila P., *et al.* (2021) Erosion of global functional diversity across the tree of life. *Science Advances* **7**, 1–13.
- 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* **1**, 9–13.
- Chytrý M., Wild J., Pyšek P., Jarošík V., Dendoncker N., Reginster I., *et al.* (2012) Projecting trends in plant invasions in Europe under different scenarios of future land-use change. *Global Ecology and Biogeography* **21**, 75–87.
- Cooke R.S.C., Eigenbrod F. & Bates A.E. (2019) Projected losses of global mammal and bird ecological strategies. *Nature Communications* **10**, 2279.
- Correia R.A., Ladle R., Jarić I., Malhado A.C.M., Mittermeier J.C., Roll U., *et al.* (2021) Digital data sources and methods for conservation culturomics. *Conservation Biology* **35**, 398–411.
- Dainese M., Aikio S., Hulme P.E., Bertolli A., Prosser F. & Marini L. (2017) Human disturbance and upward expansion of plants in a warming climate. *Nature Climate Change* **7**, 577–580.
- Devictor V., Mouillot D., Meynard C., Jiguet F., Thuiller W. & Mouquet N. (2010) Spatial mismatch and congruence between taxonomic, phylogenetic and functional diversity: the need for integrative conservation strategies in a changing world. *Ecology letters* **13**, 1030–40.
- Diagne C., Leroy B., Vaissière A.-C., Gozlan R.E., Roiz D., Jarić I., *et al.* (2021) High and rising economic costs of biological invasions

- worldwide. *Nature* **592**, 571–576.
- Evans T., Jeschke J.M., Liu C., Redding D.W., Şekercioğlu Ç.H. & Blackburn T.M. (2021) What factors increase the vulnerability of native birds to the impacts of alien birds? *Ecography* **44**, 727–739.
- Foden W.B., Butchart S.H.M., Stuart S.N., Vié J.-C., Akçakaya H.R., Angulo A., *et al.* (2013) Identifying the world's most climate change vulnerable species: a systematic trait-based assessment of all birds, amphibians and corals. *PLoS one* **8**, e65427.
- Fois M., Cuenca-Lombraña A., Fenu G. & Bacchetta G. (2018) Using species distribution models at local scale to guide the search of poorly known species: Review, methodological issues and future directions. *Ecological Modelling* **385**, 124–132.
- Fournier A., Penone C., Pennino M.G. & Courchamp F. (2019) Predicting future invaders and future invasions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **116**, 7905 LP – 7910.
- Gallardo B. (2014) Europe's top 10 invasive species: relative importance of climatic, habitat and socio-economic factors. *Ethology Ecology & Evolution* **26**, 130–151.
- Gallardo B., Aldridge D.C., González-Moreno P., Pergl J., Pizarro M., Pyšek P., *et al.* (2017) Protected areas offer refuge from invasive species spreading under climate change. *Global Change Biology* **23**, 5331–5343.
- Gaüzère P., O'Connor L., Botella C., Poggiato G., Münkemüller T., Pollock L.J., *et al.* (2022) The diversity of biotic interactions complements functional and phylogenetic facets of biodiversity. *Current Biology* **32**, 2093-2100.e3.
- González-Muñoz N., Bellard C., Leclerc C., Meyer J.-Y. & Courchamp F. (2015) Assessing current and future risks of invasion by the “green cancer” *Miconia calvescens*. *Biological Invasions* **17**, 3337–3350.
- Gotelli N.J., Graves G.R. & Rahbek C. (2010) Macroecological signals of species interactions in the Danish avifauna. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **107**, 5030–5.
- Guisan A. & Rahbek C. (2011) SESAM – a new framework integrating macroecological and species distribution models for predicting spatio-temporal patterns of species assemblages. *Journal of Biogeography* **38**, 1433–1444.
- Halpern B.S., Walbridge S., Selkoe K. a, Kappel C. V, Micheli F., D'Agrosa C., *et al.* (2008) A global map of human impact on marine ecosystems. *Science (New York, N.Y.)* **319**, 948–52.
- Heikkinen R.K., Luoto M., Virkkala R., Pearson R.G. & Körber J.H. (2007) Biotic interactions improve prediction of boreal bird distributions at macro-scales. *Global Ecology and Biogeography* **16**, 754–763.
- Hellmann J.J., Bierwagen B.G., Dukes J.S. & J. E Byers (2008) Five Potential Consequences of Climate Change for Invasive Species. *Conservation Biology* **22**, 534–543.
- Helmus M.R., Mahler D.L. & Losos J.B. (2014) Island biogeography of the Anthropocene. *Nature* **513**, 543–546.
- Jarić I., Bellard C., Correia R.A., Courchamp F., Douda K., Essl F., *et al.* (2021) Invasion Culturomics and iEcology. *Conservation Biology* **35**, 447–451.
- Jarić I., Bellard C., Courchamp F., Kalinkat G., Meinard Y., Roberts D.L., *et al.* (2020) Societal attention toward extinction threats: a comparison between climate change and biological invasions. *Scientific Reports* **10**, 11085.
- Jenkins C.N., Guénard B., Diamond S.E.,

- Weiser M.D. & Dunn R.R. (2013) Conservation implications of divergent global patterns of ant and vertebrate diversity. *Diversity and Distributions* **19**, 1084–1092.
- Jeschke J.M. & Strayer D.L. (2008) Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1134**, 1–24.
- Leclerc C., Courchamp F. & Bellard C. (2020a) Future climate change vulnerability of endemic island mammals. *Nature Communications* **11**, 4943.
- Leclerc C., Courchamp F. & Bellard C. (2018) Insular threat associations within taxa worldwide. *Scientific Reports* **8**, 6393.
- Leclerc C., Magneville C. & Bellard C. (2021) Conservation hotspots of insular endemic mammalian diversity at risk of extinction across a multidimensional approach. *Diversity and Distributions* **in press**.
- Leclerc C., Villéger S., Marino C. & Bellard C. (2020b) Global changes threaten functional and taxonomic diversity of insular species worldwide. *Diversity and Distributions* **26**, 402–414.
- Lenoir J., Bertrand R., Comte L., Bourgeaud L., Hattab T., Murienne J., *et al.* (2020) Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology and Evolution* **4**, 1044–1059.
- Lenoir J. & Svenning J.-C. (2014) Climate-related range shifts - a global multidimensional synthesis and new research directions. *Ecography* **38**, 15–28.
- Leroy B., Delsol R., Huguény B., Meynard C.N., Barhoumi C., Barbet-Massin M., *et al.* (2018) Without quality presence-absence data, discrimination metrics such as TSS can be misleading measures of model performance. *Journal of Biogeography* **45**, 1994–2002.
- Leroy B., Meynard C.N., Bellard C. & Courchamp F. (2016) virtualspecies, an R package to generate virtual species distributions. *Ecography* **39**, 599–607.
- Li X., Liu X., Kraus F., Tingley R. & Li Y. (2016) Risk of biological invasions is concentrated in biodiversity hotspots. *Frontiers in Ecology and the Environment* **14**, 411–417.
- de los Ríos C., Watson J.E.M. & Butt N. (2018) Persistence of methodological, taxonomical, and geographical bias in assessments of species' vulnerability to climate change: A review. *Global Ecology and Conservation* **15**, e00412.
- Lowe S., Browne M., Boudjelas S. & De Poorter M. (2000) *100 of the World's Worst Invasive Alien Species A selection from the Global Invasive Species Database*. (Ed. N. Speciali), Invasive Species Specialist Group.
- MacArthur R.H. & Wilson E.O. (1963) An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution* **17**, 373–387.
- Marchese C. (2015) Biodiversity hotspots: A shortcut for a more complicated concept. *Global Ecology and Conservation* **3**, 297–309.
- Marino C. & Bellard C. (2022) When origin, reproduction ability, and diet define the role of birds in invasions. hal-03563209.
- Marino C., Leclerc C. & Bellard C. (2022) Profiling insular vertebrates prone to biological invasions: What makes them vulnerable? *Global Change Biology* **28**, 1077–1090.
- Morales-Castilla I., Matias M.G., Gravel D. & Araújo M.B. (2015) Inferring biotic interactions from proxies. *Trends in Ecology and Evolution* **30**, 347–356.
- Morúeta-Holme N., Blonder B., Sandel B., McGill B.J., Peet R.K., Ott J.E., *et al.* (2016) A network approach for inferring species associations from

- co-occurrence data. *Ecography* **39**, 1139–1150.
- Mouillot D., Villéger S., Parravicini V., Kulbicki M., Arias-González J.E., Bender M., *et al.* (2014) Functional over-redundancy and high functional vulnerability in global fish faunas on tropical reefs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **111**, 13757–62.
- O'Donnell J., Gallagher R. V., Wilson P.D., Downey P.O., Hughes L. & Leishman M.R. (2012) Invasion hotspots for non-native plants in Australia under current and future climates. *Global Change Biology* **18**, 617–629.
- Pacifici A.M., Foden W.B., Visconti P., Watson J.E.M., Butchart S.H.M., Kovacs K.M., *et al.* (2015) Assessing species vulnerability to climate change. **5**, 215–225.
- Pacifici M., Visconti P., Butchart S.H.M., Watson J.E.M., Cassola F.M. & Rondinini C. (2017) Species' traits influenced their response to recent climate change. *Nature Climate Change* **7**, 205–208.
- Parravicini V., Villéger S., Mcclanahan T.R., Arias-González J.E., Bellwood D.R., Belmaker J., *et al.* (2014) Global mismatch between species richness and vulnerability of reef fish assemblages. *Ecology Letters* **17**, 1101–1110.
- Polaina E., Soutan A., Pärt T. & Recio M.R. (2021) The future of invasive terrestrial vertebrates in Europe under climate and land-use change. *Environmental Research Letters* **16**, 44004.
- Pollock L.J., Tingley R., Morris W.K., Golding N., O'Hara R.B., Parris K.M., *et al.* (2014) Understanding co-occurrence by modelling species simultaneously with a Joint Species Distribution Model (JSDM). *Methods in Ecology and Evolution* **5**, 397–406.
- Ripple W.J., Wolf C., Newsome T.M., Hoffmann M., Wirsing A.J. & McCauley D.J. (2017) Extinction risk is most acute for the world's largest and smallest vertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**, 10678 LP – 10683.
- Sax D.F., Gaines S.D. & Brown J.H. (2002) Species invasions exceed extinctions on islands worldwide: a comparative study of plants and birds. *The American naturalist* **160**, 766–783.
- Schickele A., Guidetti P., Giakoumi S., Zenetos A., Francour P. & Raybaud V. (2021) Improving predictions of invasive fish ranges combining functional and ecological traits with environmental suitability under climate change scenarios. *Global Change Biology* **27**, 6086–6102.
- Schmitt C.B. (2012) A Tough Choice: Approaches Towards the Setting of Global Conservation Priorities. In: *Biodiversity Hotspots Distribution and Protection of Conservation Priority Areas*, Springer. (Eds F. Zachos & J. Habel), pp. 23–42.
- Sobral F.L., Lees A.C. & Cianciaruso M. V. (2016) Introductions do not compensate for functional and phylogenetic losses following extinctions in insular bird assemblages. *Ecology Letters* **19**, 1091–1100.
- Sorte C.J.B., Williams S.L. & Carlton J.T. (2010) Marine range shifts and species introductions: comparative spread rates and community impacts. *Global Ecology and Biogeography* **19**, 303–316.
- Staniczenko P.P.A., Sivasubramaniam P., Suttle K.B. & Pearson R.G. (2017) Linking macroecology and community ecology: refining predictions of species distributions using biotic interaction networks. *Ecology Letters* **20**, 693–707.
- Struebig M.J., Wilting A., Gaveau D.L.A., Meijaard E., Smith R.J., Fischer M., *et al.* (2015) Targeted conservation to

- safeguard a biodiversity hotspot from climate and land-cover change. *Current Biology* **25**, 372–378.
- Taylor S., Kumar L. & Reid N. (2012) Impacts of climate change and land-use on the potential distribution of an invasive weed: a case study of *Lantana camara* in Australia. *Weed Research* **52**, 391–401.
- Thomas C.D. & Palmer G. (2015) Non-native plants add to the British flora without negative consequences for native diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**, 4387–92.
- Tikhonov G., Abrego N., Dunson D. & Ovaskainen O. (2017) Using joint species distribution models for evaluating how species-to-species associations depend on the environmental context. *Methods in Ecology and Evolution* **8**, 443–452.
- Tobias J.A., Sheard C., Pigot A.L., Devenish A.J.M., Yang J., Neate-Clegg M.H.C., *et al.* (2021) AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds. *Ecology Letters* **25**, 581–597.
- Toussaint A., Charpin N., Brosse S. & Villéger S. (2016) Global functional diversity of freshwater fish is concentrated in the Neotropics while functional vulnerability is widespread. *Scientific reports* **6**, 22125.
- Trindade W.C.F., Santos M.H. & Artoni R.F. (2020) Climate change shifts the distribution of vegetation types in South Brazilian hotspots. *Regional Environmental Change* **20**, 90.
- Walther G.-R., Roques A., Hulme P.E., Sykes M.T., Pysek P., Kühn I., *et al.* (2009) Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in ecology & evolution* **24**, 686–93.
- Warren B.H., Simberloff D., Ricklefs R.E., Aguilée R., Condamine F.L., Gravel D., *et al.* (2015) Islands as model systems in ecology and evolution: Prospects fifty years after MacArthur-Wilson. *Ecology Letters* **18**, 200–217.
- Williams J.W., Jackson S.T. & Kutzbach J.E. (2007) Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. **104**, 5738–42.
- Wolf A., Zimmerman N.B., Anderegg W.R.L., Busby P.E. & Christensen J. (2016) Altitudinal shifts of the native and introduced flora of California in the context of 20th-century warming. *Global Ecology and Biogeography* **25**, 418–429.
- Zarei A., Asadi E., Ebrahimi A., Jafari M., Malekian A., Mohammadi Nasrabadi H., *et al.* (2020) Prediction of future grassland vegetation cover fluctuation under climate change scenarios. *Ecological Indicators* **119**, 106858.

Titre : Apport de la macroécologie pour l'étude des conséquences des changements globaux sur la biodiversité : le cas particulier des systèmes insulaires

Mots clés : invasions biologiques, changements climatiques, biologie de la conservation, îles, vertébrés

Résumé :

Mes travaux de recherche portent sur la compréhension des effets des changements globaux sur la biodiversité avec une attention particulière sur l'étude des invasions biologiques dans les écosystèmes insulaires. S'appuyant sur les théories de la biogéographie insulaire, des données empiriques à large échelle et de la modélisation, mon projet de recherche vise à mieux comprendre ce qui a façonné la biodiversité à l'échelle mondiale et à appréhender le rôle des changements globaux dans la dynamique de la biodiversité. Mes travaux se divisent en trois volets dont le premier a pour objectif de mieux comprendre les patrons de distribution des espèces exotiques envahissantes à travers la théorie de la biogéographie insulaire en intégrant l'ensemble des facettes de la diversité. Le second volet aura pour but d'améliorer les scénarios de prédictions des invasions biologiques et le dernier volet portera spécifiquement sur les interactions entre les changements climatiques et les invasions biologiques. Mon projet de recherche s'est donc construit vers l'amélioration de nos connaissances dans ces domaines afin d'améliorer les travaux prédictifs mais aussi de mieux comprendre les conséquences des changements climatiques et des invasions biologiques sur la biodiversité par une approche macroécologique.