# Des îles et des espèces

## En suivant Wallace,

Dans l'introduction de son livre "Island Life" paru en 1881, le célèbre naturaliste Alfred Russel Wallace nous rapporte deux faits étonnant qui justifient pleinement l'examen attentif de la répartition géographique des espèces (Wallace, 1881). Premièrement, la biogéorphe montre avec des exemples multiples que l'éloignemnet de deux régions du monde n'est pas suffiant pour conclure quand à l'éloignement de leur composition faunistique et floristique. Ainsi, comparer les groupes d'oiseaux de l'île japonnaise d'Hokkaido avec ceux de l'Angleterre, pourtant séparés par des miliers de kilomètres, révèle une proximité des paysages ornithologiques bien supérieure à celle constatée entre les îles indonesiennes de Bali et de Lombok distantes de quelques dizaines de kilomètres seulement. Deuxièmement, en s'appuyant sur les différences des faunes brésiliennes et africaines sous des latitudes similaires, Wallace souligne la faiblesse du pouvoir prédictif des variables climatiques pour décire les compositions fauniques. Par la mise en évidence de ces deux éléments, Wallace souligne le besoin de croiser les informations des distributions à la lumière d'une analyse taxonomique. Dans le cadre de la théorie de l'évolution[[1]](#footnote-23), encore toute jeune en 1881, cette analyse taxonomique est en fait une analyse historique. Wallace affirme ainsi que la compréhension d'un problème spatial, celui des aires de répartition de groupes d'espèces proches, n'est possible que par une compréhension temporelle, celle de l'histoire des espèces, cette idée est clairemnt énoncée dans la même introduciton :

« Many years study of this class of subjects has convinced me that there is no short abd easy method of dealing with them; because they are, in their very nature, the visible outcome and residual product of the whole past history of the earth. »

Tout au long de son livre, Wallace démontre que la connaissance à l'échelle mondiale de la distribution des êtres vivants à travers le monde permet de relier les différentes îles aux grands ensembles régionnaux biologiques (que nous appelons aujourd'hui écozones) et que ces groupes sont aussi relié par des liens historiques dont la taxonomie révèle les traces. Ce travail de charactérisation d'ensemble géographique conduit Wallace, dans un article de 1860 (Wallace, 1860), à tracer la ligne séparant l'écozone indomalaise de l'écozone australienne (qui sépare notamment Bali et Lomonk citées plus haut) qui porte encore aujourd'hui son nom. L'éclaircissement de la géographie par l'histoire est saississant et les exemples de Wallace sont autant de poids données à la théorie de l'évolution. Le discours de Wallac porte sur des processus à des échelles spataile et temporelles très grandes,[[2]](#footnote-24) et bien que l'éclaircissement substantiel des répartitions géogrpahiques des êtres vivants par l'évolution, cette expliqcation se double d'un obstacle épistémologique important : si l'explication ultime de la présence d'une espèce en un point donné est le produit d'une série de contingences historiques, sur quoi bâtir une théorie de la biogéographie? Ce n'est qu'au XX^ème siècle que des réponses convaincaites émergeront avec a fructuseuse rencontre du mathématicien et biologiste Robert Helmer MacArthur et du myrmécologue Edward Osborne Wilson.[[3]](#footnote-25)

## En suivant MacArthur et Wilson

La collaboration de ces deux jeunes biologistes a mené à la formulation d'une théorie de la biogéographie insulaire publiée en 1967 sur laquelle je reviendrai abondammnent tout au long de mon introduction (MacArthur and Wilson, 1967) puisqu'elle est un des piliers de ma thèse. Leur démarche a été de collecter un grand nombres de données sur différents groupe d'espèces sur des îles dispersées un peu partout dans le monde et pour essayer de mettre une cohérence à travers ces faits avec un cadre théorique puissant. Comme indiqué au au dernier chapitre de leur livre de 1967, ces auteurs souhaite voir la biogéographie entrer dans une nouvelle phase :

« Biogeography has long remained in a natural history phase, accumulating information about the distribution of species and higher taxa and the taxonomic composition of biotas. Interpretative reasoning has been largely directed to the solution of special problems connected with the histories of individuals taxa and biotas. Without doubt this descriptive activity will continue to be of fundamental importance to the science, one of the most physically adventurous of all scientific entreprises and, in the richness of the detail it unfolds, esthetically pleasing. But biogeography is also in a position to enter an equally interesting experimental and thereotical phase. »

MacArthur et Wilson affirment que l'étude de la distribution des espèces doit sortir du royaumes des contingences pour devenir un objet de science au sens d'être manipulé aussi bien expérimentalement que par l'abstraction mathématique. La validation expérimentale de la théorie a été menée par Wilson et son étudiant au doctorat de l'époque, devenu depuis le grand écologue Daniel Simberloff, avec une expérience de défaunation de six petits îlots de mangrove dans la Baie de Floride (Daniel S Simberloff and Edward O Wilson, 1969). La travail d'abstraction mathématique a été conduit par MacArthur dans le livre de 1967 et prolongé dans les annexes de son livre de 1972 (MacArthur, 1972). Leurs efforts conjugués ont donné le jour à une vision puissante de la biogéographie dans laquelle la richesse spécifique d'une île donnée est le résultat de deux porcessus oposés : un processus de colonisation qui augmente le nombre d'espèce sur l'île et un porcessus d'extinction qui le diminue. En reliant ces processus aux propriétés physiques de l'île (aire et isolation) et en interprétant la richesse spécifique des îles en terme d'équilibre entre ces deux processus, les auteurs parviennent à expliquer de manière convaincante les relations observées entre richesse spécifique, taille de l'île et isolement (je reviens amplement sur cette théorie dans le troisième temps de cette introduction).

Le paradigme données par les auteurs est un lègue qui a eu un impact considérable sur les développemnt théorique en écologie (**???**). Au coeur de la réussite du modèle, il y a la vonlonté de mettre l'espèce au coeur de la biogéographie de ne pas simplemnt parler de grands ensembles régionaux et d'em discuter l'histoire nais aussi de coprendre les mécanismes biologiques plus fins qui sont le moteur essentiel de la variation dans la distribution des espèces. Tout l'intérêt de leur *biogéographie de l'espèce* (terme donné à l'avant-dernière phrase de leur livre de 1967) est dans l'affirmation qu'il faut repgarder les contraintes conjointe de l'évolution (qui met un certain nombre de groupes taxonomiques en présence) et du context écologique qui régit les conditions d'extinction. Cette intrication de l'écologie et de l'évolution est bien inscript dans la pensée de MacArthur et Wilson même si la puissance de leur vision réside dans le fait de les occulter en partie.

Près de 50 and après la parution de leur livre, une des clef en biologie semble être la compréhesion des retro actions l'écologie et de l'évoluton dans les varitions spatiale et temporelles de la biodiversité. On peut reprendre les trois aphorismes cités par Schoener (2011a) :

« Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. » (Dobzhansky, 1964)

« This was supplanted half a century later by (2): Nothing in evolutionary biology makes sense except in the light of ecology. » (Grant and Grant, 2008)

« Nothing in evolution or ecology makes sense except in the light of the other. » (Pelltier, 2009)

Au sein de la communauté, l'idée qu'il est difficle d'isoler les deux discipline et cela indépendamment de l'échelle cnsidérée semble gagner du terrain. Un parrallèle avec les sciences humaines me semble possible l'écologie serait à la biologie ce que la géographie est aux sciences humaines et aussi que l'évolution serait à la biologie ce que l'histoire est aux sciences humaines. Nous pouvons bien sur étudier l'une sans l'autre, mais le dialogue entre les deux disciplines est indispensable sinon elles avancent en faisant des hypothèses fortes sur l'autre et qui finiront éventuellement par nuire à la compréhension. Aisin supposé que les ressort de la varation sont puremnt des mécanimes écologique alros que dans certains système la variation allélique peut affecter rapidement et formtement la démogrpahie est problématqie (Pelletier et al., 2007). Néanmoins chaque discipline a des connaissance à apporter pour nourir ce dialogue et la Biogéogrpahie est le champ qui tente de conprendre l'information refermée dans les distributions d'espèces.

## Quelles informations renferment les distributions d'espèces?

Cette question est non seulement une invitation à découvrir les raisons de la présence de tel ou tel organisme en un lieu donné du globe, mais elle suggère ausi que certaines informations ne sont pas obtenue par l'analyse de répartion géographique des espèces. Les grands auteurs mentionnés dans les paragraphes précédents y ont apporté des éléments de réponse essentiels : Wallace a montré que la distribution reflètait en partie les liens de parenté entre les esèces, quant à MacArthur et Wilson, ils ont suggérés que ces distributions étaient le résultats de processus écologiques dynamiques. Examiner les aires de répartition, relever les variations spatiales et temporelles, mais aussi détailler la géométrie exacte au regad de variables abiotique ou à la lumière de la géométrie d'autres espèces est une clief pour apprécier les mécanismes sous-jacents.

Dans son ouvrage de 1972, MacArthur se livre à un examen approfondi du sujet en examinant des aires de répartition au regard des variables climatiques mais aussi les variations teporelles ou encore les relations qu'il existe entre les distributions d'espèce en compétition. Il propose un cadre mathématique pour comprendre l'impact de la prédation et de la compétition sur lequel repose un prinicpe de ségrégation spatiale d'espèce en compétition : deux compétiteurs ne peuvent pas co-occurer (être trouver au même endroit) sauf éventuellement sur zone très restreinte de leur distribution (MacArthur, 1972). Toujours dans ce même ouvrage, MacArthur évoque la distribution en damier (*checkerboard*) que peuvent générer des espèces en compétition. Ce type de distribution sera approfondie et quantifiée par Jared Diamond (Diamond, 1975) dont les travaux déclencheront un débat important sur la determination de modèle null de co-occurrence (Connor and Simberloff, 1979).

L'analyse des distributions d'espèce est riche quand l'anaylse a de multiple approche. Bien entendu dans un premier temps, l'examen sur de multiple aires de répartition est un premier pas pour y déceler des phénomènes répétés nécessaires à l'élaboration des théories (MacArthur, 1972). C'est aussi dans l'examen des variations spatiales et temporelles que les informations abondent car si ces variations sont par exemple reflétées dans els changelmnts climatiques, cela justifie l'espoir de comprendre l'évolution des distributions d'espèces dans un context de chanmgement climatique. De plus, l'examen d'une distribution est aussi à faire par comparaison avec d'autre espèces notamment les espèces en interaction pour voir si la biologie laisse ces empreintes dans la géométrie de ces aires de répartition. C'est ainsi que dans ma thèse, je propose de regarder l'intersection des aires d'un ensemble de proies pour comprendre ce que la co-occurrrence peut nous apprendre.

## Enjeux de la connaisssance de la répartition géographique des espèces

Les enjeux fondamentaux ont été évoqués plus haut : les observations et la compréhension des causes profondes de la géométrie et la dynamique des aires de répartitions des espèces ont déjà amené à des découvertes majeures en écologie et en évolution. La phase d'expérience et de Théorie décite par MacArthur et Wilson se poursuit et l'espoint se tourne vers la possibilité d'obtenir des prédictions fiabkes sur les aires de répartitions futures d'une espèce données. Ce problème est d'autant plus pesant dans la litérature en biogéograhique dans le contexte actuel des changements globaux. En biogéogrpahie, les changements climatiques ont canalisés l'attention et les chercheurs constatent l'ampleur à laquelle la biodiversité mondiale est affectée par ces derniers (Koh, 2004, Bellard et al. (2012)). Le volonté d'anticiper où seront les espèces demain a également engendré un effort de développemnet d'outils statistiques essentiellement centrés sur la correlation entre les variables abiotiques et occurrence des espèces (Elith et al., 2006).

En choississant de parler de telle ou telle espèce, nous glissons rapidement à des enjeux sociaux et économiques évidents. Ainsi, pour un pays comme la France, comprendre les impacts des changements climatiques sur la productions du vin est un enjeu central, prédiction de contractions des aires de production favorables dans les grandes régions viticoles (Hannah et al., 2013), on peut aisément deviner ou seront les grands vignobles de demain à de multiple conséquences économiques sur les cours des vins, les millésimes, le prix de ces terres agricole. Pour aborder un exemple québécois, posons la question suivant : où seront les érablières de demain? La réponse à cette question réside dans la détermination de la répartiton future des aires favorable à la croissance de l'érable à sucre (*Acer saccharum*) mais aussi de leur possibilité de migrer efficacemnet pour s'y installer. Bien que les prédictions des modèles d'évolution de la composition des forêts borel au nord du Québec fassent des prédictions sur la Baie d'ungava il semble que le taux de migration empêche d'atteindred ces terres éloignés à moins d'envisager des migrations assistée. Je finirais par un troisième exemple celui souvent mis en évicende de la perte des pollinisteurs et notamment des abeilles. Pas moins de quatres grandes classes de facteurs d'origine anthropique les mettent en dangerr : , les changements climatiques, le chagement de l'utilisation des terres[[4]](#footnote-29), l'apparition de nouveaux pathogenès (dont l'accarien parasite *Varroa destructoa* vecteur de nombreux virus) (Vanbergen, 2013). Le défi actuel est donc de prédire la distribution future en intégrant ces mutiples aspects et donc la distribution d'espèce en interaction qui ne peuvent donc êtres traitées séparément.

Actuellement, les outils de prédictions des aires de répartition future reposent essentiellement sur les scénarios de changments climatiques (RCP). La démarche est cohérente, la connaissance basée sur les corrélation de variable climatique dont les climatologues sont en mesure de fournir des gammes d'estimation relativement fiables qui sont une base de reflexion importante sur les zones favorables à ;a croissance des différentes espèces. Mais les porblénatiques d'invasion d'espèces nous rappellemnt que nous sommes souvemt en mesure de comprendre le potentiel invasof seulemnet a posyteriori. Ces porblèmes de qualit. de distribution sont le reflet de lacune théorique qui amène les chercheurs à se positionnier en faveurs d'un renouvellemnt théorique avec l'objecif de la création d'une biogéographie intégrative capable de préiction fiables (M. V. Lomolino, 2000, Beck et al. (2012), Thuiller et al. (2013)). Biensur ces appels soulèvent des défis techniques et théoriques importants dont on ne peut qu'espèrer qu'il soit relevé au plus vite en dépit de l'urgence.

## Travail théorique et modélisation

Avant d'énumérer, avec des exemples concrets, l'ensemble des forces qui régissent la répartition géogrpahique d'une espèce, je précise dans cette partir l'importance du travail de théorie et de modélisation qui tient une place importante dans ma thèse.

### Rassembler et intégrer des faits

Le travail de théorie est avant tout la mise en cohésion d'un certain nombre de faits. Dans leur théorie de la Biogéograohie des îles, les auteurs parviennet à montrer que les relations en terme de richesse spécifique s'exlique bien, dans les données qu'ils possèdent, par la connaissance combiner de l'isolement des îles et de leur taille. Il y a également deux principes principes qui encadrent la construction d'une théorie scientifique : elle demeur valide lorsqu'elle n'est pas prouvé fausse et qu'une alternative ne la supplante pas, elle doit être parcimonieuse, ne pas invoquer de multiple processus sans raison, c'est ce que l'on appelle parfois le Rasoir d'Ockham. C'est qu'une boutade, dont je ne suis pas capable de rapporter son auteur, indique que les physiciens expliquent 95% de l'univers avec 5 règle alors que les économistes expliquent 5% des phénomènes qu'ils étudient avec 95 règles.[[5]](#footnote-32) Le problème n'est pas tant de dénigrer une discipline mais de constater la puissance prédictive d'une théorie problèmes que posent actuellement la prédictions en économie. C'est peut-être le reflet d'une maturité pour la physique il n'en demeure pas moins que des défis majeur et de grands questionnement la traverse. La théorie est une construction mentale qui permet de donner un cadre de penser et ce dernier peut être explorer à travers des modèles.

### Des modèles pour explorer la théorie

Le terme de modèle signifit simplement que l'objet en question à des propriétés bien connu. Ainsi un organisme modèle est un organisme sur lequel souvent facile à elever et maniupluler sur lequel beaucoup de connaissance nt été établis et qui sert d'unité empirique à travers un ouo plusierus laboratoires. Quand on travail sur des modèles statisique, on connait exactement le type de correlation que l'on entreprend. De même pour un travail de modellisation mathématique, la description du modèle est contenu dans une série d'équations. Un modèle est souvent perçu comme une simplification de la réalité, en effet, comment prétendre que les mécanismes biologiques décelés chez *Arabidopsis Thaliana*[[6]](#footnote-34) sont les mênes pour l'ensemble des plantes à fleurs? Pour combien de système proie-prédateur le modèle de Lotka-Volterra est-il pertinent?

Les limites des modèles doivent être reconnues mais il ne faut pas nier l'apport de ces derniers. Ainsi les modèles sont autant de chance pour explorer une ou plusiers prédiction d'une théorie. Le choix du modèle est laissé au chercheur, comme le rappelle Kevin McCann dans la préface de son livre *Food Webs* (McCann, 2011):

« It just so happens that some people find it easier to think about things in terms of x's and y's, and other in terms rabbits of and lynx. »

En d'autres termes, certains on plus de faciliter pour penser en termes mathématiques et d'autres en termes expirimentaux. Je suis plutôt dans la première catégorie de personne, je pense que les mathématiques sont un cadre de penser très puissant comme l'indique le grand écologue Robert McCredie May (May, 2004):

« The virtue of mathematics in such a context is that it forces clarity and precision upon the conjecture, thus enabling meaningful comparison between the consequences of basics assumptions and the empirical facts. Here mathematics is seen in its quintesence : no more, but no less, than a way to think clealy. »

Dans ma thèse j'ai essayé d'utilisé les mathématiques pour développer des modèles qui sont surtout parti de reflexion collective autour du rôle que pouvaient jouer les interactions dans les distrbution d'espèce. Cette reflexion m'a parmis d'établir des prédictions dont certaines semblent être vérifiées.

### Nouvelles prédictions

Après l'établissent d'un théorie suportée par un certain nombre de fait, le cadre conceptuel qu'elle propose étant travailler autour de travaux expérimentaux et de modélisations, de nouvelles prédictions émergent. La vérificaton des prédictions autour de nouvelles expérience et si elles sont vérfiée la théorie en sera renforcer. Ces dernières années, la physique nous a donnée des exemples très importants ces dernières années de vérification de théorie énoncée bien avant que les outils permettant de mettre au point leur vérification existent : la détection, validée en 2012, du Boson de Higgs dont l'éxistence a été prédite énoncée en 1964[[7]](#footnote-36) et la détection des ondes gravitationelles cette année soit 100 ans après qu'Einstein en ait prédit l'existence (Waldrop, 2016). Dans le cadre de la biogéographie, la validation d'une théorie puissant em Biogéogrpahie pourrait être possible si les aires de répartition futurtee sont préditcte correctment et si les pertes d'espèces, les conséquence de l'introduction de telles ou telle espèces sont validées. Pour y parvenir, cela demande d'être en mesure de connaître l'ensemble des nécanimses qui interviennet dans le tracé des aires de répartiton, comment ces processus interagissent et quels sont leurs imprtances relatives.

# Répartition géographiques des espèces, les forces en présence

## Biogéographie historique

Il s'agit du récit des variations temporelles à larges des échelles temporelles. C'est dans l'étude de la proximité des taxons mais aussi des fossiles éventuels que l'on déchifre comment certains groupes ont colonisés tels ou tels lieu. La théorie de la dérive des continents établie par Alfred Lothar Wegener, notamment basée sur la similarité de fossiles trouvés sur des continents très èloignés, implique que des groupes éventuellement proche il y a des milions d'année ont été séparée et on donnaée maissane à des lignées différentes. Aujourd'hui nous sommes capables de retracer ces liens de parenté à l'aide de phylogénies moléculaires sont des outils très efficace pour comprendre depuiis quand les différents taxons ont été séparée. Par la compairaison des génômes motochindiriaux, il a été montré récemment que les lémuriens (primates malgaches) ont été séparées de toute autre lignée de primates il y a 60 milions d'année environs (Finstermeier et al., 2013). Une autre partie du travail devant ces faits est de comprendre quels ont été les mécanismes qui ont conduit à l'isolation de ce groupe de singes à Madagscar et à la construction des communautés que nous observons actuellement (Razafindratsima et al., 2013).

Les processus de grande amplitude temporelle sont cependant dominés par le poids historique et prédire un phénomène tel que l'extinction des dinosaurs n'est chose aisée qu'une fois qu'il s'est déroulé. Cela dit, en regardant des évènemnets plus récents, certains mécanimes puis être mis en jeu. Aisin, l'étude de la diversification des bouziers entrepris par Joachim Hortal et collègues (Hortal et al., 2011) montre que la dernière glacition qui a cntraint le range de ces espèces sesibles au froid, a laissé des empreintent encore visible dans la diversité de ce groupe : la limite de la thermocline 0°C durant le dernier maximum glacier ( il ya 21000 ans environs) sépare les zones de fortes diversié en bouzier. De plus, ils montrent que la diversité phylogénique des espèces plus au nord, c'est-à-dire plus tolérante au froid, est un sous-ensemble phylogénétique très restrient, c'est à dire que peu de branches de ces bouziers sont à l'originie des colonisations nordique. Ainsi après uen conrtaction des ranges, il y a une empreinte sur la diversification des espèces et ceux malgré leur capacité de dispersion (Hortal et al., 2011).

## Capactés de dispersion

La remonté nordique des bouziers depuis le dernier maximum glacier signalé au pargraphe précédent est sans doute liée à des évènemnets de dispersion individuel. Au cours de leur vie, les bouziers parcourent de grandes distances à la recherche de nouriture, s'ils établissent leur terrier un peu plus au nord au fil des générations, l'aire de répartition s'étendra également plus au nord à condition que les mouvements individuels soient assez abindant pour permettre à une population de se péreiniser en ces nouvelles latitudes. Ce qui est vrai pour ce groupe d'espèce mobile l'est égalemnt pour des espèces sessiles commes les plantes qui possèdent égalemnt des capacités de disperion liée à la dissimination de leurs semences par des mécanimes très diversifiés. Ce rapport à l'espace des différents organismes est une forme de diffusion: des mouvements stpchastiques qui aboutissent pour des questions de probabilités à une augmentation de la répartition, mais cette diffusion n'est pas complètemnet libre.

Plusieurs type de contraintes limitent l'élargissemnt de l'aire de répartition d'une espèce. Si on se focalisent sur une espèces terrestres, les mers et les océans sont des obstacles majeurs à la colonisation de nuvelles terres. A l'échelle du régionale, les rivivères, les haits reliefs peuvent limiter fornatemnt la dispersion d'une espèce. De même pour les plantes dissiminat par le vent, ces derniers peuvent fortemnt influencer le vitesses et direction de la propagation des espcèes. Enfin à l'échelle du paysage, il existe très souvent une mosaique d'habitat squi sont plus ou moins favorables à la dispersion d'un espèce. Toutes ces possibilités sont complexes à intégrer et c'est en partie pour cela que la théorie en Biogéographie a été fondé sur les îles : les flux de colonisateurs sont plus faciles à identifier.

L'expérience historique de Simberloff et Wilson dans laquelle ils ont éradiqué la faune de six îlots de mangrove rouge dans la Baie de Floride à montrer qu'en une année, la richesse spécifique en insecte était similaire à celle constatée avant de commencer l'expérience (Daniel S. Simberloff and Edward O. Wilson, 1969). Ainsi, les évènemnents de colonisation bien qu'individuel peuvent être assez fréquents pour et conduire à l'établissement de population et même d'une communauté locale d'insecte. Cette abondance des migrants est aussi à traduire en terme génétique car plus il et fort pus il conduit au brassage de la communauté locale avec la communauté régionale, les espèces ont donc des probabilités moindres de se séparer.

A l'échelle d'un continent, malgré les divers obstacles physiques existant, il est très probable qu'une espèce donnée puisse, en un temps plus ou moins long, atteindre n'importe quelle zone du continent. Cependant, le plus souvent, les aires de répartition des espèces sont le plus souvent limitée à une portion du continent. Pour comprendre ces restrictions, il faut invoquer des différences d'adaptation des espèces aux différentes conditions environnementales.

## Contraintes abiotiques et niche fondamentale

Dans le chapitre 6 de son livre de 1972 *Geographical Ecology* MacArthur (1972) présente l'importance des contraintes climatiques à travers l'exemple de l'aire de répartition du cactus Saguaro (*Cereus giganteus* en 1972 mais aujourd'hui *Carnegiea gigantea*). Ce résident des hateurs du désert de Sonora (bordé à l'ouest par l'océan pacifique) est sensible au gel et ne peut pas resister à une exposition de quelques dizaines d'heures au gel. Cette contrainte physiologique explique bien les limites nord et est de sa répartition. Pour la limite sud, il semberait que l'abondance des pluies hivernales ne lui soit pas favorables. En s'appuyant sur les conditions climatiques actuelles dans lesquelles le cactus se développe, des résulats récents prédisent que dans le cadre des changements climatiques, *Carnegiea gigantea* trouvera refuge a des altitudes supérieures mais que ce mouvement pourrait être entravé par l'augmentation de la fréquence des feux (Springer et al., 2015).

Cette démarche de croisement de la limite des aires de répartition avec des variables climatqiues est une forme répendue de la détermination de la niche écologique d'une espèce. Le concept de niche est très débatu en écologie et son charactère élusif s'accopagne un certains nombre de problèmes[[8]](#footnote-41). Afin d'éviter ces problèmes je parlerai de la niche au sens de Grinnel qui en tentant d'expliquer la retsriction de la répartition du Califoria Thrasher, Joseph Grinnel écrit :

An explanation of this restricted distribution is probably to be found in the close adjustment of the bird in various physiological and psychological respects to a narrow range of environmental conditions.

Dans cet article il montre que la présence du Califoria Thrasher est corrélé avce des température chaude et une humudité suffisante (Grinnell, 1917). Au delà de la niche mesurée, c'est la recherche des considitons possibles d'existence qui est importante, la niche dite fondamentale. La démarche de caractéristion de cette niche a été poussé à son paroxysme dans l'article de Michael Kearney et Waren Porter sur le gecko nocturne australien *Heteronotia binoei* (Kearney and Porter, 2004). Ils ont montrés qu'en combinant des mesures physiologiques (dont le taux métaboliques au repos, le température cumulées nécessaire au bon développement des oeufs et des mesures de températures charactéristiques) avec des données climatiques, ils obtenaient une bonne concordance des probabilités d'occurrence et des observations, ce qui justifiait la démarche prédictive s'appuyant sur des scénarios de changement climatiques pour aller essayer de comprender les réapartitions futures.

De manière générale, la méthode est la recherche de facteurs abiotiques limitants la répartition géographiques qui sont supposé refléter les contraintes physiologiques. Au niveau du Panama, par exemple, Engelbrecht et al. (2007) ont montrés que les distributions locales et régionales de 48 espèces d'arbres étaint bien expliquées par la sensibilité à la sécheresse, donc à une variation dans la disponibilité d'une ressource. Ces corrélations convaincantes fondent les modèles de distributions d'espéces (SDM enréférence au terme anglais utilisé souvent dans le reste de la thèse) qui sont des solutions techniques (statistique) pour l'appliaction de la méthode générale que je viens d'énoncer (Elith et al., 2006, Elith and Leathwick (2009)).

L'engoument actuel autour de ces modèles est lié à l'espoir de pouvoir faire des prédictions fiables sur les variations des aires de répartiton dans un contexte de changement climatique. Cette démarche semblent être pertinent pour de nombreux exemple de changemnets récents de réparitions, par exemple en 2009, Tingley et collègues ont ainsi montré que sur 53 espèces d'oiseaux étudiés dans la Sierra Nevada, 48 ont colonisé de nouveaux sites où les conditions de température et de précipitations leur étaient plus favorables (Tingley et al., 2009). Une autre justification de l'utilisation abondant sdes SDMs est la relative facilité de mise en application de ces méthodes grâce à l'abondance des données climatiques et d'occurence et au partage des implémentations numériques de ces méthodes statistiques. Pour le premier type de données, WorldClim propose des données à l'échelle mondiale gratuitement téléchargeables (voir <http://worldclim.org>, Hijmans et al. (2005)). Pour les données d'occurrence, plusierus initiative propose des données gratuites dont les plus exhaustives sont celles que l'on trouve sur le portail de données sur la biodiversité à l'échelle mondiale GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*, voir <http://www.gbif.org>) malgré des biais lié à des efforts différents dans les différentes régions du globe (Beck et al., 2014). Enfin pour ce qui est le partage de la, en écologie cela se traduit avec le logiciel R (R Core Team, 2015) et des packages comme bioclim ou plus récement +++ qui facilie la mise en place d'une série d'analyse.

Un des principaux problèmes posés par la facililté et massive de ces approches est le manque de regard sur l'application d'alternative et la faible remise en question sur les hypothèse sur lesquelles elles reposent. Le message délivré par les SDMs doit être pris comme une potentialité : étant donné les conditions actuels dans lesquels une espèce est trouvé et connaissance les variations de ces dernières basée sur des modèles climatologiques relativement fiable, s'il n'eciste pas d'obstacle majeur de movment alors il est probable que l'espèce suive ces conditions climatiques, ce qui nous permet de savoir ou sera l'espèce demain. Ce messge est délivré en supposant que 1- une forme d'équilibre des espèce et des conditions climatiques et 2- que les espèces sont indépendantes (Jeschke and Strayer, 2008). Ces deux hypothèses sont très fortes et demandeent un examen approfindie, dans la mesure où ma thèse porte sur la seconde, je propose de la discuter dans le pararaphe suivant en abordant les liens qui existent entre les espèces.

## Réseaux d'interactions : interdépendance des espèces

Au chapitre 6 de *Geographical Ecology*, MacArthur parle clairement de la contrainte biotique notamment du rôle que peu avoir la compétition pour comprendre la distribution des espèces (MacArthur, 1972). Il reprend l'exemple donnée par Brown en 1971 de l'exclusion compétitive de deux espèces de de tamias, *Eutamias dorsalis* et *E. umbrinus*, dans les forêts d'altitude (au dessus des déserts) de pins et de junipers (*pinyon-juniper woodland* woodland) du Sud outes des Etats-Unis. L'article de Brown montre bien comment une différence comportementale peut engendrer une séparation des distributions locales. Ainsi, l'aggressivité de *Eutamias dorsalis* lui est favorable dans les forêts clersemées de basse-altitude où son compétiteur doit dépenser beacoup d'énergie pour se réfugier dans un arbre, elle devient pénalisante lorsque l'abondance des arbres augmente et facilite la fuite de *E. umbrinus* (**???**). La segregation locale des deux espèces reflète donc bien une interaction biotique, il y a une information comportementale dans ces aires de répartitions.

Au-delà de la competition, l'écologie des réseaux nous montre aujourd'hui la difficulté de concevoir les espèces comme étant des entitées indépendantes, elles sont reliées par des relations de natures très diverses. Les relations trophiques sont les plus évidentes, il existe cependant une myriade d'interactions non trophiques qui affectent aussi la démographie des espèces (voir Kéfi et al. (2012) pour une relexion sur le sujet et une classification de ces interactions). De plus, aucun argument théorique ne justifie actuellement la primauté d'un type d'nteraction sur les autres. Récemment, les interactions trophiques et non-trophiques ont été exhaustivement analysées pour 104 espèces des écosystèmes interdidaux rocheux de la partie centrale de la côte chilienne révélant ainsi que les interactions non-trophiques y étaient globalement plus abondantes et concentrées sur les bas niveau trophques (Kéfi et al., 2015).

L'écologie des réseaux est traversé de débat dont le plus important est vraisemblablement celui de la relation qu'il existe entre la diversité spécifique d'un écosystème et sa stabilité (May, 1973, McCann (2000)). Autour de cette question, l'écologie s'est considérablement enrichit en terme d'outils mathématiques. Une preuve récente de cette idée est la mise en évidence par Stefano Allesina et Si Tang du caractère destabilisant des interactions de compétition et de mutualismes et stabilisant des relations trophiques (Allesina and Tang, 2012) qui est l'application d'un résultat mathématqiue récent établit par Terence Tao et Vam Vu (Tao et al., 2010). Les réseaux contiennent de nombreuses informations sur les relations entre espèces et résume un certain nombre d'information sur l'écologie des population. A mos sens, les réseaux d'interactions sont à placer au coeur d'une théorie intégrative de la biogéographie pour la renouveler. Cette idée n'est pas seulement la mienne, MacArthur et Wilson l'ont clairemnt énoncé au dernier paragraphe de leur théorie de la biogéographie avec ces mots :

« In short, biogeography appears to us to have developed to the extent that it can be reformulated in terms of the first principles of population ecology and genetics. »

Et pour appuyer cette phrase dans son entièreté, je développe un certain nombre d'idées relatives à l'importance des échanges génétiques.

## Echanges d'informations génétiques et processus micro-evolutifs

La vie, telle que nous la connaissons, pérennise l'information accumulée au cours du temps via à un support moléculaire, l'ADN. J'ai déjà évoqué que les informations véhiculées par cette molécule pouvaient permettent d'établir des relations de parenté entre les espèces. Cette possibilité est rendue possible par les mécanismes qui la modifient. L'information génétique d'un individu est un ensemble de base qui contient l'ensemble de l'information pour assurer le développement de l'individu. Néanmoins, le code génétique de certaines cellule de l'individue peut être modifié (des mutations) et être trasmis à la descedance. Sous certaine condition la mutation peut rester dans la population. bien loin d'être une combinaison précise de pair de bases, l'ADN d'une espèces est un ensemble de possibilités, de versions de ce code possible mais contraint par un certaines règles. Pour schématiser, les échanges de gènes douvent rester possible entre individus d'une même espèce. A l'échelles de populations, tant que les échanges d'informations sont importants la compatilbilité est assurée mais lorsque ces échanges diminuent ou même cessent, les supports d'information peuvent alors diverger et à terme empêcher les échanges ce qui conduit à la distinction deux espèces. Bien que cette vision soit très simpifiée, elle permet de comprendre que l'ADN de deux espèces puissent refléter leur lien de parenté qu'il permet l'établissement d'une phylogénie moléculaire.

Cela étant dit, les cause de la divergence de l'ADN sont multiples mais ce qui m'intéresse ici, ce sont que les variations puissent engendrer un différentiel démographique possitive dans un milieu nouvellement exploré par une population alors que cette même variation dans un autre milieu ne l'était pas. La vitesse des mécanimes semble bien plus rapide au point qu'il puissent être clef dans les changements climatiques (Lavergne et al., 2010). En 2009, Joan Balanyá et collègues puclient un article dans lequel ils comparent la composition génétique de la mouche *Drosophila subobscura* entre des échantillons contemporains et des échantillons prélevé 24 années auparavant en Europe et Amérique (où elle a été introduite accidentellement). Leurs résultats montrent que dans les zones de réchauffement climatique avéré, il y a aussi un changement de la composition génotypique avec une plus grande importance des génômes adaptés au température plus chaudes (Balanyá et al., 2006).

La preuve des conséquences des variations génétiques rapides et des conséquence sur la démographies des populations poussent les chercheurs à se demander si négliger ces processus dans les travaux de dynamiques de populations n'est pas porblématique (Pelletier et al., 2009, Post and Palkovacs (2009), Schoener (2011b)). Takehito Yoshida et collègues montrent que la réponse des algues vertes unicellulaires *Chlorella vulgaris* aux rotifères *Brachionus calyciflorus* conduit à un changement dans la fréquence et la phase des cycles de la dynamiques proie prédateur (Yoshida et al., 2003). En 2009, une étude basée sur un suivi de plus de 20 ans d'une population de moutons Soay sur l'île d'Hirta dans l'archipel de Saint-Kilda (au nord-est de l'Écosse), Fanie Pelletier et collèges établissent les variations dans la taille corporelle des ovins, d'origine génétique, et les variation dans leur survie et leur reporduction, ils démontrent alors que les facteurs génétiques peuvent contribué jusqu'à 20% de la croissance de la population certaine année. Les conséquences des dynamique eco-evolutive et l'intégration des flux d'information génétiques sont certainemnt capitaux pour comprendre la biodiversité de demain (Sexton et al., 2009, Lavergne et al. (2010)), nous sommes face à un enjeu appliqué important et pourtant nos connaissancse fondamentales resten insufisantes. Pour illustrer ces lacunes et l'urgence dans laquelle nous nus trouvons, je discute d'un exemple concret : l'invasion européenne du frelon asiatique.

## L'invasion européenne du frelon asiatique

*Vespa velutina* est une espèce présente depuis le nord-est de l'inde jusqu'à l'est de la Chine et frelon asiatique est présente du nord est de l'inde et sur une bande est ouest du nord de l’Inde à la Chine et de la péninsule et de l'indochinoise à l’archipel indonésien (Villemant et al., 2006). Dix sous-espèces sous identifié dont *Vespa velutina nigrithorax* qui a été observé pour la preière fois en France en 2004 dans le Lot-et-Garonne chez un producteur de bonzaï qui importe régulièremnt des poteries du Yunnan (Villemant et al., 2006). Ce frelon se nourrit d'abeilles qu'il plaque au sol lors de leur retour à la ruche chargées de pollen. Les conséquences sont désastreuses et ce même dans les zones d'origine. L’abeille asiatique (*Apis cerana*) est certes capables de tuer un frelon en l'entourant et le tuant en hyperthermie augentant la suphicant en augmentant la température mais les attaques répétées affaiblissent la ruche car les ourières se consacrent moins à la recherche de pollen. L'abeille européenne (*Apis mellifera*) est capable d'utiliser la même stratégie de défense mais avec une effacicité moindre (Villemant et al., 2006). Ce frelon représente un danger pour l'entomofaune mais aussi menace un secteur déjà affaiblie, l'apiculture. Le problème est de connaître les zones ptentiels et essayer de mettre en place des mesure de prévention et d'éradication de cette espèce invasive.

En 2006, le frelon s'étendait largement en Aquitaine et voyait son aire de répartition s’étendre sur une bande de 300 km du nord au sud et de 150 km d’est en ouest (Villemant et al., 2006) et cela malgré l'éradication systématique des nids détectés. Alors que 2 nids étaient observés en 2004, 1636 nids ont été observé en 2009 et en 2013 près des trois quarts des départements étaient affectés (Robinet et al., 2016). Des travaux récents tentent de charactériser la niche fondamentale des espèces pour comrprendre queles sont les zones à l'échelle modiale suceptible compredre et montrenet qu'une large partie du bassin malgré des différences davec la zone actuels. Un autre phénomène intéressant est que dans le même temsp l'espèce à coloniser le Corée du Sud avec un succès de colonisation. On a donc un évènment de colonisatio vraisembalblement rare si ce n'est unique qui arrive à une colonsation mais sur des zines ou pas si porbable et des différence entre deux pays. L'exolication plausible est la différence de comporsiiton speécifique notammment en espèce appreneté il n'y aqu'un frelon (*V. crabro*) et près de six en Corée du Sud dont *(V. mandarinia)* dominante (Villemant et al., 2011). Montre bien que c'est un carrefour entre histoire condition climatique et biotique, mais aussi certaine variété pourraitent ajuster leur stratégie face au prédatur qui de surcorit en bottle neck génétique. Complexité du sujet demande un cadre théorique puissant.

# Cadre théorique de la thèse

Les développements que j'ai entrepris durant ma thèse sont des tentatives pour ancréer les interactions entre les espèces dans la théorie de la biogéographie des îles de MacArthur et Wilson dont j'ai déjà abondamment. Je vais maintenant revenir sur cette théorie plus en détail pour expliquer pouquoi elle a marqué durablement l'écologie.

### Une vision puissante de la dynamique des distributions d'espèces

Dans leur livre *The Theory of Island Biogeography*, MacArthur et Wilson doutent les idées qui y sont présentées résisteraientt longtemps surtout quand elle serait testé empiriquement :

« We do not seriously believe that that the particular formulations advanced in in the chapters to follow will fit for very long the exacting results of future empirical invesitgation. (péface de l'édition de 1967) »

Et pourtant fort près de 50 ans après la parution de leur ouvrage, leur travaux sont le findemnet de nombreux développement récents en témoigne le livre paru en 2010 *The Theory of Island Biogeography Revisited* (Losos and Ricklefs, 2010) et l'article de perspective publié par Ben Warren et collègues dans *Ecology Letters* (**???**). L'idée majeure de la TIB est simple et puissante : étant donné une île colonisable par un ensemble d'espèces depuis un continent voisin, la diversité locale résulte de la balance entre 1- des évènments de colonisation depuis le continent et 2- des extinctions locales. La TIB est une métaphore, le cas simple d'un territoire isolé (l'île) où les flux d'individus depuis le pool d'espèces régionales (le continent) sont facilement représentables. Le modèle peut donc être étendu à de nombreux cas où un territoire isolé est colonisé par les organismes à proximité, par exemple après un incendie ou une fragmentation de l'habitat (Cook et al., 2002). Au chapitre 5 de son livre de 1972, MacArthur prend l'exemple des îlots formée par la végétation paramó situé sur les hauteurs de Andes péruviennes. Plus généralement, le modèle est acceptable est très adaptable avec néanmoins un certains nombre d'hypohèse notamment une certaine rgigdité dans dans le pool régional d'espèces (au moins en nombre d'espèce) et une absence de rétroaction dans la communauté locale sur le pool régional.

Il y a une forme de hasard et de nécéssité qui fait echo à l'oeuvre de Jaques Monod (**???**). Alors que le célèbre biologiste évoque les mutations comme source de hasard, dans le la théorie de MacArthur et Wilson, l'évènemnent de colonisation peut être interprété ce pourvoyeur de stochasticité dont deux dimensions sont à mon sens essentiel. Premièrement, la prédiction qu'on peut en faire est une prédiction de fréquence ainsi parle-t-on de taux de colonisation. Deuxièmement, l'arrivée d'une espèce est un tirage aléatoire dans un ensemble régional (éventuellemnt pondéré par ces capacités de dispersion) et qui présente un certain nombre de caractéristique et une histoire évolutive propre. L'espèce immigrante est alors contrainte d'arriver sur l'ïle où elle ne peut s'installer que si le contexte biotique et abiotique lui permet, le nouvel arrivant passe donc au crible des contraintes écologiques, de ce qui est une forme de nécessité. Le résulats est la formation d'une communaté nouvelle et de manière plus générale le moteur de la reconfiguration perpetuelle des réseaux écologiques locaux. Cette dynamique est égalemnt une imbrication de deux échelles de porcessus le pool régionale d'espèce est façonné par une histoire évolutive de grande amplitude et des consiération à de contexte climatique à large échelle alors que les évènemnts sur l'îles sont des évènemnts d'échelle montre qu'une singularité dans le paysage régional avec la considération de processus d'échelle plus courte (Ricklefs, 1987).

Dans cette théorie, il y a une forme d'équivalence écologique des espèces : les espèces sont non identifiées car ce qui intéresse les auteurs est une projection sur la richesse mais aussi cela permet de réduire les espèce à deux caractéristique. Cette démarche peut être perçue comme entithétique pour des auteurs qui cherchent à formuler une « biogéogrpahie de l'espèce » (Lomolino and Brown, 2009) et de surcroit connaissant la qualité de ces deux naturalistes. Cependant, la forme d'équivalence amanée par les auteurs ne nie la diversité et la compléxité elle est plutôt une abstraction nécessaire pour capturée le processus essentiel au dela des singularité. Une connaissance plus fine et trop particulière serait vraissemblablement un obstacle à une généralisation (Lomolino and Brown, 2009).

### Le modèle mathématique et les prédicitons de la TIB

Je ne souhaite pas rentrer dans des détails mathématiques du modèle, je les ai abordé dans la version la plus simple dans un article de vulgarisation pour le journal Acromath (**???**) que je joins en annexe de l'introduction. J'écris simplement l'équation qui est souvent utiisé pour désigner le modèle : les espèce du continent colonise avec un taux l'île dont la richesse est alors augmenté mais ces événments de colonisation peuvent être contrebalancé par des extinctions dont le taux est noté :

La variation temporelle de la richesse s'annule pour une valeur lorsque la richesse spècifique est tel que les forces de colonisation et d'exctinction se contrebalancent :

Cette équilibre est une prédiction très importante de la théorie, elle a été validée par l'expérience de défaunation de Simerloff et Wilson (Daniel S Simberloff and Edward O Wilson, 1969). Une seconde prédiction est la variation de cet équilibre avec les caractéristiques de l'île (MacArthur and Wilson, 1963). Dès leurs article de 1963, MacArthur et Wilson présentent la taille de l'île comme un un facteur affectant le taux d'extinction : plus l'île est grande, moins le risque d'extinction est grand. De même, ils supopsent que l'isolement de l'île en affecte le flux de migrant : une île isolée est difficilement accesible et donc le flux de migratoire est plus faible que celui d'une île proche du continent (voir la figure (**???**)). La théorie est aisni une explication à l'ensemble des relations des diversités retrouvées sur les îles et distillé dans le livre de 1967. Notamment celle de l'augmentation du nombre d'espèce de l'herpetofaune dans les caraibes (West idndies) présemtéen en ouverture du chapitre 2.

De manière plus générale, la théorie fournit une explication à la relation aire-espèce qui est une des plus discutée en écologie (M. Lomolino, 2000). Il s'agit de l'étude de l'augmentation de la richesse spécifique () lorsqu'on augmente la surface d'échantillonage (). La question fondamentale derrière ces courbes est de comprendre les mécanimes qui la déssinent et quels sont les causes de variation régionales. La théorie de la biogéogrpahie des îles apporte une explication pour une courbe de la forme qui colle bien au données avec des valeurs de Z comprise entre .2 et 0.35 pour les îles et plutot autour de 0.15 oour le continent et un ajustement taxonomique etrégionale pour (MacArthur and Wilson, 1967). Cette relation est surtout connu pour ces application en conservation[[9]](#footnote-50) car elle pernet de justifiée la taille qu'une zone de protection pour obetnir un objectif chiffré en nombre d'espèce à sauvegrarer (Neigel, 2003, Desmet and Cowling (2004)) et égalemnt pour estimer estimer des taux d'extinction (He and Hubbell, 2011).

![Figure 1: La Théorie de la biogéographie des Iles. (A) L'évolution des taux de colonisation et d'extinction est présentée pour deux îles aux caractéristiques différentes. Les tailles relatives des îles et les distances qui les séparent du continent sont schématisées à droite du graphique, les couleurs associent les îles à leurs courbes respectives. Le pool d'espèce régional (P) est constitué de 100 espèces, les taux de colonisation et d'extinction sont exprimés en terme de probabilité d'évènement. Les points où colonisation et extinction s'équilibrent sont marqué par les symboles en gris. (B) et (C) sont respectivement les figures 4 et 5 extraites de l'article de 1963 de MacArthur et Wilson qui livre essentiellemnt le même message illustré en (A) (MacArthur and Wilson, 1963). La forme convexe des courbes de 1963 sont justifiées par des facteurs biologiques qui ne sont pas intégrés dans l'équation  qui donne une forne concave comme montré en (A).](data:application/pdf;base64,)

Figure 1: **La Théorie de la biogéographie des Iles.** (A) L'évolution des taux de colonisation et d'extinction est présentée pour deux îles aux caractéristiques différentes. Les tailles relatives des îles et les distances qui les séparent du continent sont schématisées à droite du graphique, les couleurs associent les îles à leurs courbes respectives. Le pool d'espèce régional () est constitué de 100 espèces, les taux de colonisation et d'extinction sont exprimés en terme de probabilité d'évènement. Les points où colonisation et extinction s'équilibrent sont marqué par les symboles en gris. (B) et (C) sont respectivement les figures 4 et 5 extraites de l'article de 1963 de MacArthur et Wilson qui livre essentiellemnt le même message illustré en (A) (MacArthur and Wilson, 1963). La forme convexe des courbes de 1963 sont justifiées par des facteurs biologiques qui ne sont pas intégrés dans l'équation qui donne une forne concave comme montré en (A).

### L'importance de la TIB dans des déveloopemnt théoriques plus récents

### La théorie des métapopulations

Bien que ne représentant que cinq pourcents des teres émergeés, le developement théoriques autour des piles est vraisembalblment lié au caractère répétables de ces îles : elles sont nombreuses et reltivemnt aisée à acractéris, la relative simplicité des assemblages spécifiques et comme je l'ai évoqué auparavant, une isolation des flux (Simberloff, 1974). Cette hypothèse bien que propice à la conpréhension doit être levée quand on s'intéresse à des populations continentales (et même à des îles de grandes taille, on avec des structure en stepping stones). La théorie des métapoputaion est justeemnt une réponse à cela.

### La théorie neutre de l'écologie et le débat qu'elle soulève

Ecological equivalence des individus OK mais peut-être que l'abondance des interactions expliques aussi Problème si explication alternatives possibles alors on n'est pas obligé de mettre pour expliquer quoi que ce soit. De plus savons nous si c'est discernable ??? Si le deux relation aire espèce sont différentes d'un groupe à l'autre alors oui... Mais sinon... Non.

### Vers une théorie plus intégrative

Dans la réédition de 2001 [] Wilson rappelle que le problème :

"The flaws of the book lie in its oversimplification and incompleteness, which are endemic to most efforts at theory and synthesis."

L'effort théorique nécessaire en biogéographie porte sur l'intégration ordonnée de concepts clés issus de différents champs de l'écologie . Ainsi, alors que les conditions climatiques et plus généralement la géographie physique sont classiquement évoquées pour expliquer la répartition des espèces , les interactions entre espèces sont quant à elles souvent occultées. De même, bien que les processus évolutifs soient souvent évoqués comme déterminants majeurs de la diversité des espèces , leurs effets à court terme sont souvent ignorés dans les scénarios décrivant la biodiversité de demain . La difficulté principale est alors de produire des modèles (théoriques en première instance) qui intègrent l'ensemble des processus et les relations qu'ils entretient tout en gardant une relative simplicité. Une théorie intégrative en biogéographie pourrait être le meilleur point d'ancrage pour construire de nouvelles approches appliquées. Avec une telle théorie en main, nous pourrions aller vers l'enjeux majeurs de ces dernières années en biogéographie : relâcher les hypothèses que les modèles classiques de répartitions des espèces d'aujourd'hui utilisent (notamment en occultant les interactions) pour prédire la biodiversité de demain .

Dans le projet ici présenté, nous proposons de construire des modèles théoriques plus intégratifs en repartant d'un modèle théorique classique, celui de la théorie de la biogéographie des îles proposée par MacArthur et Wilson . Dans un premier temps, nous y ajoutons les interactions entre espèces et une relation explicite avec l'environnement abiotique au travers d'une approche communauté centrée qui étend le modèle classique. Dans un second temps, nous combinons une approche population centrée et les processus évolutifs pour une biogéographie insulaire plus mécaniste. Enfin, au regard des enjeux que soulève le rôle des interactions entre espèces dans la construction de la biodiversité, nous réfléchissons sur l'inférence d'espèces interdépendantes.

différentes théories pour différentes échelles ??

De part son pouvoir explicatif et son élégance, le modèle de MacArthur et Wilson est un point de départ approprié pour construire des modèles plus intégratifs en intégrant explicitement des processus écologiques et évolutifs. Cette idée n'est pas nouvelle et les auteurs de la TIB ont étudié un certain nombre de processus écologiques. Notamment, ils ont intégré les phénomènes de spéciation et réfléchis sur l'importance des interactions quant à la répartition des espèces . Néanmoins, dans le modèle classique, l'ensemble de ces aspects sont absents, l'idée que les processus écologiques importent peu aux larges échelles domine. Nous allons, dans ce projet, à l'encontre de cette idée et proposons de construire des modèles intégratifs qui étendent la TIB.

isolation / faune particulière des îles

Ainsi, ce modèle a déjà été utilisé avec succès par Gravel 2011 pour l'élaboration de leur théorie trophique de la biogéographie des îles .

# Le rôle des interactions dans la distribution des espèces

L'objet central de ma thèse est l'introduction de ma thèse est d'essayer de regrader la théorie de la biogéographie et notamment quelles onfornatiosn 'écologie des réseayx peurt ameenr de la lumière sur la théorie. Dans cette dernière partie de mon introduction, je présente avec pkus de délément l'importance de l'intriduction des onteractions dans une théorie de la biogéographie. Cela me permettra d'introduire nes contributions qui seront détaillées dans ma thèse.

Wallace conclut :28 qu'une théorie générale doit tenir compte des variation range et proximité des espèces porches et des overlapp.

Both competition and predation appear now to be much more important in biogeography than people had formely guesses

## Pourquoi les intéractions ne joue-t-elle pas un rôle majeur

### La théorie de la biogéograohie ne les nient pas bien au contraire

La théorie de la Biogéographie des îles (et il en va de même pour la théorie neutre) est certes une théorie qui ne s'articule pas sur les interactions et fais une forme d'équivalence écologique, les idées sont clairemnent oser que localemnt les raisons profindes de l'extinciton locale. La question que l'on peut alors se poser est de savoir si les c'est si on peut aller plus loin qu'une simple enonciation des proncipes tout en gardante une cohérence. Aiinsi i lsemble omportant que la théorie de la Biog.éogrpahie doit intégrer des résultats précis en terme de réseaux. Dans le premier chapitre j'ai poursuivi cette idées et est montré qu'une approche communait centrés pouvat être prpoposé. Ne pas considéere mdes espèces mais des aassembalges est une bonne échelle pour aborder des problèmes des conséquences écologques des transients. Il est aussi int.ressant que cela nous a fait glissé vers la compréhension des résulats qu'om doit avoir dans les données de co-occurrene.

Accent sur les cascading effect est surtout un problème de l'instabiilté (**???**) Il ya aussi l'article perturbant de Säterberg et al. (2013) qui montre que le fait qu'une espèce soit (ex. pêche) peut conduirte à des extinctions d'autres espèces lié dans le réseau... Ces deux exemple montrent que les interactions peuvent mener à des problèmes de prédicitons et donc porblèmes sur prévoir les services ecosystémiques et c'est appuyer par Cahill et al. (2013) qui nous indique en somme que le changemment des interactiosn biotiques ets la voie privilégiée d'extintionciton dans un contexte de changement climatique.

chap 2 geographical ecology

il prend comme exemple la compétition entre oiseau et un manque de ressource pour une année partiuculièremnet sévère et que 19 and pas assez pour voir et il conclut que

This is the main reason most evidence for competition is from biogepgraphers.

Distributiin des fauvettes *Crateroscelis robusta* et *C.runa*

Mais le p

### Problème d'échelle

Oubli de ce facteur important de Ls SMDS...

Les interactions intra et inter spécifiques constituent un facteur rapidement pressenti comme responsable de la distribution spatiale des espèces . L'interdépendance des espèces conditionne, en effet, l'aspect favorable de l'environnement au sens large (biotique et abiotique). Ainsi Godsoe 2012, mettent en équations le caractère favorable de l'environnement pour une espèce donnée en terme de probabilité de présence d'une autre espèce et de la nature de leur interaction . De même, Holt et Barfield 2009 montrent l'impact de la prédation sur la répartition d'espèces en compétition insistant ainsi sur le rôle majeur des interactions. Davis 1998 ont montrés que, pour trois drosophiles en compétition, l'effet d'un parasitoïde n'est pas le même le long d'un gradient selon que les espèces sont seules ou ensemble . Récemment, des efforts ont été réalisés pour mettre en évidence l'importance de l'interdépendance des espèces dans les données aux larges échelles spatiales . On trouve actuellement dans la littérature une grande motivation pour les intégrer dans les modèles de distribution d'espèces . Des efforts théoriques sont encore nécessaires pour arriver à de telles approches. Néanmoins, rapprocher différents champs de l'écologie peut s'avérer d'une utilité majeure. Jabot et Bascompte 2012, ont d'ailleurs montré l'importance des interactions pour comprendre la distribution des espèces en rapprochant écologie des réseaux et un modèle de metacommunauté. De même Gravel 2011 introduise l'interdépendance proie-prédateur dans le modèle classique de MacArthur et Wilson menant aux prémices d'une théorie trophique de la biogéographie des îles.

L'ajout des interactions dans un modèle incluant l'environnement abiotique interroge la relation que les deux processus entretiennent. Si les espèces n'ont pas les mêmes performances dans différents milieux du fait de leur physiologie, pour les mêmes espèces considérées, les réseaux n'ont pas de raison d'être identiques d'un milieu à un autre. C'est sur ce fait que Poisot 2012 ont proposé une mesure de dissimilarité des réseaux . Defossez montrent que les interactions négatives entre l'hêtre commun () et les micro-organismes du sol diminuent avec l'altitude . Ainsi, les contraintes biotiques sont à relier à l'environnement et un modèle intégratif doit donner un cadre cohérent à ces rétroactions entre processus. Enfin, l'importance des interactions est à mettre en relation avec l'échelle considérée . Pour deux espèces en interaction, plus l'échelle d'étude est large, moins les effets des interactions locales sont susceptibles d'être capturés, le pouvoir explicatif de la présence d'une espèce sur l'autre peut être alors discutable . Comprendre quels sont les processus à prendre en compte aux différentes échelles spatio-temporelles et comprendre comment le changement d'échelle affecte nous prédictions est aussi un véritable challenge en biogéographie .

### Un problème d'échelle ?

Comment les varitions démogrpahiques interactions se propagent-t-elle à travers les échelles spatiale.

However, it is argued that applying bio-climatic models at macro-scales, where climatic influences on species distributions are shown to be dominant, can minimize the impact of biotic interactions. Indeed, the fact that a number of bioclimatic models have been highly successful at simulating current species distributions at certain scales is in fundamental disagreement with the proposition that species distributions cannot be adequately defined by climatic factors alone. (Pearson and Dawson, 2003)

We will never be able to predict the future with accuracy, but we need a strategy for using existing knowledge and bioclimatic modeling to improve understanding of the likely effects of future climate on biodiversity. (Araujo and Rahbek, 2006).

Les ranges comme un fait (wallace chap 2) des espèces avec des larges avec des grandes ranges Loddigésie admirable (*Loddigesia mirabilis*) seul collibris de son genre vs Lièvre variable (*Lepus timidus*) nomnbre d'espèce dans un genre vaire beaucoup => un autre indice de solution pas fructifiées... Pithacia Monathus vs Pithecia pythecia separé par une rivière Geographical Ecology => patterns in the distribution of spceies 2 espèces proches des ranges très séparéed => species Bonobo et cChimpanzés

orblème étant que le signal n'est visible que si on a des données sur 20and.

Le problème

Parallèle entre information des traits sur le régime allimentaire et l'information dans les ranegs est-ce cela qui conduit les ecologistes à être des statisticuencs. et l'info dans l'ADN

## Faire un questionnement des intersections des ranges et des règles

On a besoinde rule on reste descriptive il y a des relation EH-Bioversité, SAR, Diversité-équilibre diversité fonctionnenemnt qui sont partielelemnt reliées et des théries débat theories neutre theéor de la niche Stein et al. (2014). Dans cette review Stein et al. (2014) montre que vegetaiton est inportnates ce qui eimplique des inbteractions. Théorie allométrique prometteuse en ce sens qu'elle loi physiques. Différents concept autrour d'une même notion sur plusieurs paradigme pour une même notion sur les metacommunity Leibold et al. (2004) il peuvent co-exister mais faudrait les savoir ce qui fait qu'on a pus l'un ou l'autr.

La puissance de la Biogéographie est aussi sont implications dans des cas très concrets Cirtwill and Stouffer (2015) mais aussi ne puissance exploratoire théoriques Gravel et al. (2011) Cazelles et al. (2015) des îles l'idée des interactions à déjà montré ça pertinence sur plusieurs exemples. Cirtwill and Stouffer (2015)

Les interactions quelles pourrait être leur conséquence à large échelle ?

(:154) "Does the environment dictate the structure of the community, or are the species a fairly random assemblage?

Cette id.e aussi est données par

A few decades ago it as fashionable for ecologist to study communities in the arctic on the grounds that these would be very simple communities and hence easy to understand. Many excellent ecologists still follow this belied, but there are others who feel that it may be easier to understand the extremely complex communities. This sounds paradoxical: How can a more complex communities by easier to understand? A possible answer might be that complex community has has strong interactions among species so that the lives of the separate species are less independent than in a simple community. Where there is greater interdependence, patterns may be more conspicuous."

Information dans les distributions gecko australien généraliste *Heteronotia binoei* => alors peut être que ça marche bien mais sur une espèce spécialiste ??

Generalist consumers should typically be weakly coupled to any one of their prey populations because, when feeding on many different species, they cannot be strongly coupled to any one of them Murdoch et al. (2002)

Intégrations des contraintes biotiques et de la théorie à la recherche de signaux de d'intéraction

Dans ma thèse j'ai oassé du temps à essayer de mettre au point un modèke qui donnait de la substace aux idées de MacArthur et Wilson een etandant le travai initié par Gravel et collègues pour aller plus loin dans la compréhension des effets joints des interactions et des contraintes abiotiques. C'est aussi ce qui m'a animé pour en mettre en place la compréhesin dans les données de co-occurrence avant d'aller m'y confronter frongalemnet. Ma dernière intergtaion a Été de trouver des pistes pour allerr plus loin dans la théorie et explorer des pistes que je n'avais pas encore dxplorer mais qui seront à court terme les directions que je souhaite explorer.

Abondance des données Les atouts actuels de la biogéographie sont 1- une quantité importante d'information relative aux présences d'espèces et au climat et 2- des modèles corrélatifs puissants qui décrivent précisément le lien entre l'espèce et son environnement abiotique. Le terme abiotique peut prêter à confusion dans la mesure où les espèces elles-mêmes peuvent modifier des variables dîtes abiotiques. Par exemple, les végétaux peuvent avoir un grand impact sur les variables abiotiques locales comme la température et l'humidité du sol . Certains auteurs font une distinction précise en utilisant les termes de pour les variables environnementales sur lesquels les espèces ne peuvent influer et de pour les autres . Nous occulterons volontairement ces-dernières, l'environnement abiotique dont il est ici question n'est donc pas dynamiquement lié aux espèces.

Partir du development de la niche et des hypotheses clef comme l'heterogeneité spatiale qui peut accroitre la biodiversité un exemple c'est les ecoulemnents à petites faible echelles de l'hydrologie niche hdrologique à fable échelles Letten et al. (2015) repartition hydrologique les hypothèses sont qui explique celon les différentes besoin des espèces (principes de la niche) que besoin différemtes me répartition des espèces. Cette idées est

Mais une espèce généraliste autant que sécialiste Poisot et al. (2015)

A large espes répartition de la biodiversité on quantifie la différence depuis les mesures classiques. Simpson, alpha gamma beta qui sont étendues au réseau Poisot et al. (2012). Mais quand on chnage d'echelle on arrive rarement à quelques choses de concluant pour l'integration des interactions. Pourtant il ya des exemples convaicant comme celui de Gitelli.

-- conclure en repartant sur l'exemple détaillé. Vespa aussi au Amérqieu la densit. des traffic... Multi couche de distrobution dans le cas du frelon asiatique Villemant et al. (**???**) ont montrés que superposition du genre *Vespa* et notamment au niveau asiatique énormément aisin l'inférence se fait sur des données qui comporte une empreinte de condition et localemnt éteinte alors que possiblement comtraite qui ne seront pas en France... Essyer de faire des cartes de risques plutôt que de constater après coup... Après avoir fait un retour sur plus de biologie je m,intergoge sur lesquelle dans la suiste Dépasser les questionnemnet sur les espèces la contrainte il me semble qu'une piste c'est aouverte avec des questions énergétique on se rencontre qu'il y a des base én.ergétiqe dcommunet et que c'est ancrage sit beaoup...

# annexes

Allesina, S., Tang, S., 2012. Stability criteria for complex ecosystems. Nature 483, 205–208. doi:[10.1038/nature10832](https://doi.org/10.1038/nature10832)

Arabidopsis Genome Initiative, 2000. Analysis of the genome sequence of the flowering plant Arabidopsis thaliana. Nature 408, 796–815. doi:[10.1038/35048692](https://doi.org/10.1038/35048692)

Araujo, M.B., Rahbek, C., 2006. How Does Climate Change Affect Biodiversity? Science 313, 1396–1397. doi:[10.1126/science.1131758](https://doi.org/10.1126/science.1131758)

Balanyá, J., Oller, J.M., Huey, R.B., Gilchrist, G.W., Serra, L., 2006. Global genetic change tracks global climate warming in Drosophila subobscura. Science (New York, N.Y.) 313, 1773–5. doi:[10.1126/science.1131002](https://doi.org/10.1126/science.1131002)

Beck, J., Ballesteros-Mejia, L., Buchmann, C.M., Dengler, J., Fritz, S.A., Gruber, B., Hof, C., Jansen, F., Knapp, S., Kreft, H., Schneider, A.-K., Winter, M., Dormann, C.F., 2012. What’s on the horizon for macroecology? Ecography 35, 001–011. doi:[10.1111/j.1600-0587.2012.07364.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07364.x)

Beck, J., Böller, M., Erhardt, A., Schwanghart, W., 2014. Spatial bias in the GBIF database and its effect on modeling species’ geographic distributions. Ecological Informatics 19, 10–15. doi:[10.1016/j.ecoinf.2013.11.002](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.11.002)

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. doi:[10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x)

Cahill, A.E., Aiello-Lammens, M.E., Fisher-Reid, M.C., Hua, X., Karanewsky, C.J., Ryu, H.Y., Sbeglia, G.C., Spagnolo, F., Waldron, J.B., Warsi, O., Wiens, J.J., 2013. How does climate change cause extinction? Proceedings. Biological sciences / The Royal Society 280, 20121890. doi:[10.1098/rspb.2012.1890](https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1890)

Cazelles, K., Mouquet, N., Mouillot, D., Gravel, D., 2015. On the integration of biotic interaction and environmental constraints at the biogeographical scale. Ecography n/a–n/a. doi:[10.1111/ecog.01714](https://doi.org/10.1111/ecog.01714)

Cirtwill, A.R., Stouffer, D.B., 2015. Knowledge of predator-prey interactions improves predictions of immigration and extinction in island biogeography. Global Ecology and Biogeography n/a–n/a. doi:[10.1111/geb.12332](https://doi.org/10.1111/geb.12332)

Connor, E.F., Simberloff, D., 1979. The Assembly of Species Communities: Chance or Competition? Ecology 60, 1132. doi:[10.2307/1936961](https://doi.org/10.2307/1936961)

Cook, W.M., Lane, K.T., Foster, B.L., Holt, R.D., 2002. Island theory, matrix effects and species richness patterns in habitat fragments. Ecology Letters 5, 619–623. doi:[10.1046/j.1461-0248.2002.00366.x](https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00366.x)

Desmet, P., Cowling, R., 2004. Using the species-area relationship to set baseline targets for conservation. Ecology And Society 9, 1–39.

Diamond, J.M., 1975. Assembly of species communities, in: Cody, M.L., Diamond, J.M. (Eds.), Ecology and Evolution of Communities. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA., pp. 342–444.

Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., J. Hijmans, R., Huettmann, F., R. Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J., G. Lohmann, L., A. Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., McC. M. Overton, J., Townsend Peterson, A., J. Phillips, S., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., E. Schapire, R., Soberón, J., Williams, S., S. Wisz, M., E. Zimmermann, N., 2006. Novel methods improve prediction of species’ distributions from occurrence data. Ecography 29, 129–151. doi:[10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x](https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x)

Elith, J., Leathwick, J.R., 2009. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 40, 677–697. doi:[10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159)

Engelbrecht, B.M.J., Comita, L.S., Condit, R., Kursar, T. a, Tyree, M.T., Turner, B.L., Hubbell, S.P., 2007. Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests. Nature 447, 80–82. doi:[10.1038/nature05747](https://doi.org/10.1038/nature05747)

Finstermeier, K., Zinner, D., Brameier, M., Meyer, M., Kreuz, E., Hofreiter, M., Roos, C., 2013. A Mitogenomic Phylogeny of Living Primates. PLoS ONE 8, 1–10. doi:[10.1371/journal.pone.0069504](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069504)

Gravel, D., Bell, T., Barbera, C., Bouvier, T., Pommier, T., Venail, P., Mouquet, N., 2011. Experimental niche evolution alters the strength of the diversity–productivity relationship. Nature 469, 89–92. doi:[10.1038/nature09592](https://doi.org/10.1038/nature09592)

Grinnell, J., 1917. The Niche-Relationships of the California Thrasher. The Auk 34, 427–433. doi:[10.2307/4072271](https://doi.org/10.2307/4072271)

Hannah, L., Roehrdanz, P.R., Ikegami, M., Shepard, A.V., Shaw, M.R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P.a., Hijmans, R.J., 2013. Climate change, wine, and conservation. Proceedings of the National Academy of Sciences 110, 6907–6912. doi:[10.1073/pnas.1210127110](https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110)

He, F., Hubbell, S.P., 2011. Species-area relationships always overestimate extinction rates from habitat loss. Nature 473, 368–71. doi:[10.1038/nature09985](https://doi.org/10.1038/nature09985)

Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25, 1965–1978. doi:[10.1002/joc.1276](https://doi.org/10.1002/joc.1276)

Hortal, J., Diniz-Filho, J.A.F., Bini, L.M., Rodríguez, M.Á., Baselga, A., Nogués-Bravo, D., Rangel, T.F., Hawkins, B.A., Lobo, J.M., 2011. Ice age climate, evolutionary constraints and diversity patterns of European dung beetles. Ecology Letters 14, 741–748. doi:[10.1111/j.1461-0248.2011.01634.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01634.x)

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. doi:[10.1196/annals.1439.002](https://doi.org/10.1196/annals.1439.002)

Kearney, M., Porter, W.P., 2004. MAPPING THE FUNDAMENTAL NICHE: PHYSIOLOGY, CLIMATE, AND THE DISTRIBUTION OF A NOCTURNAL LIZARD. Ecology 85, 3119–3131. doi:[10.1890/03-0820](https://doi.org/10.1890/03-0820)

Kéfi, S., Berlow, E.L., Wieters, E.A., Joppa, L.N., Wood, S.A., Brose, U., Navarrete, S.A., 2015. Network structure beyond food webs: mapping non-trophic and trophic interactions on Chilean rocky shores. Ecology 96, 291–303. doi:[10.1890/13-1424.1](https://doi.org/10.1890/13-1424.1)

Kéfi, S., Berlow, E.L., Wieters, E.A., Navarrete, S.A., Petchey, O.L., Wood, S.A., Boit, A., Joppa, L.N., Lafferty, K.D., Williams, R.J., Martinez, N.D., Menge, B.A., Blanchette, C.A., Iles, A.C., Brose, U., 2012. More than a meal… integrating non-feeding interactions into food webs. Ecology Letters 15, 291–300. doi:[10.1111/j.1461-0248.2011.01732.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01732.x)

Koh, L.P., 2004. Species Coextinctions and the Biodiversity Crisis. Science 305, 1632–1634. doi:[10.1126/science.1101101](https://doi.org/10.1126/science.1101101)

Lavergne, S., Mouquet, N., Thuiller, W., Ronce, O., 2010. Biodiversity and Climate Change: Integrating Evolutionary and Ecological Responses of Species and Communities. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 41, 321–350. doi:[10.1146/annurev-ecolsys-102209-144628](https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144628)

Leibold, M.a., Holyoak, M., Mouquet, N., Amarasekare, P., Chase, J.M., Hoopes, M.F., Holt, R.D., Shurin, J.B., Law, R., Tilman, D., Loreau, M., Gonzalez, a., 2004. The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology. Ecology Letters 7, 601–613. doi:[10.1111/j.1461-0248.2004.00608.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00608.x)

Letten, A.D., Keith, D.a., Tozer, M.G., Hui, F.K., 2015. Fine-scale hydrological niche differentiation through the lens of multi-species co-occurrence models. Journal of Ecology 103, 1264–1275. doi:[10.1111/1365-2745.12428](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12428)

Lomolino, M., 2000. Ecology’s most general, yet protean pattern : the species area relationship. Journal of Biogeography 27, 17–26.

Lomolino, M.V., 2000. A call for a new paradigm of island biogeography. Global Ecology and Biogeography 9, 1–6. doi:[10.1046/j.1365-2699.2000.00185.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00185.x)

Lomolino, M.V., Brown, J.H., 2009. The reticulating phylogeny of island biogeography theory. Q. Rev. Biol. 84, 357–390. doi:[10.1017/CBO9781107415324.004](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004)

Losos, J.B., Ricklefs, R.E., 2010. The Theory of Island Biogeography Revisited. Princeton University Press, Princeton, NJ.

MacArthur, R.H., 1972. Geographical Ecology: Patterns in the Distribution of Species, Biology / [princeton university press]. Princeton University Press.

MacArthur, R.H., Wilson, E.O., 1967. Theory of Island Biogeography, Princeton landmarks in biology. Princeton University Press, Princeton, NJ.

MacArthur, R.H., Wilson, E.O., 1963. An equilibrium theory of insular zoogeography. Evolution 17, 373–387.

May, R.M., 2004. Uses and abuses of mathematics in biology. Science (New York, N.Y.) 303, 790–3. doi:[10.1126/science.1094442](https://doi.org/10.1126/science.1094442)

May, R.M., 1973. Stability and complexity in model ecosystems. Monographs in population biology 6, 1–235. doi:[10.1109/TSMC.1978.4309856](https://doi.org/10.1109/TSMC.1978.4309856)

McCann, K.S., 2011. Food Webs, Monographs in population biology. Princeton University Press.

McCann, K.S., 2000. The diversity-stability debate. Nature 405, 228–33. doi:[10.1038/35012234](https://doi.org/10.1038/35012234)

Murdoch, W.W., Kendall, B.E., Nisbet, R.M., Briggs, C.J., McCauley, E., Bolser, R., 2002. Single-species models for many-species food webs. Nature 417, 541–543. doi:[10.1038/417541a](https://doi.org/10.1038/417541a)

Neigel, J., 2003. Species-area relatioships and marine conservation. Ecological Applications 13, 138–145. doi:[10.1890/1051-0761(2003)013[0138:SARAMC]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0138:SARAMC]2.0.CO;2)

Pearson, R.G., Dawson, T.P., 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? Global Ecology and Biogeography 12, 361–371. doi:[10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x](https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x)

Pelletier, F., Clutton-Brock, T., Pemberton, J., Tuljapurkar, S., Coulson, T., 2007. The evolutionary demography of ecological change: Linking trait variation and population growth. Science 315, 1571–1574. doi:[10.1126/science.1139024](https://doi.org/10.1126/science.1139024)

Pelletier, F., Garant, D., Hendry, a P., 2009. Eco-evolutionary dynamics. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 364, 1483–9. doi:[10.1098/rstb.2009.0027](https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0027)

Poisot, T., Canard, E., Mouillot, D., Mouquet, N., Gravel, D., Jordan, F., 2012. The dissimilarity of species interaction networks. Ecology letters 15, 1353–61. doi:[10.1111/ele.12002](https://doi.org/10.1111/ele.12002)

Poisot, T., Kéfi, S., Morand, S., Stanko, M., Marquet, P.A., Hochberg, M.E., 2015. A continuum of specialists and generalists in empirical communities. PLoS ONE 10, 1–12. doi:[10.1371/journal.pone.0114674](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114674)

Post, D.M., Palkovacs, E.P., 2009. Eco-evolutionary feedbacks in community and ecosystem ecology: interactions between the ecological theatre and the evolutionary play. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 364, 1629–40. doi:[10.1098/rstb.2009.0012](https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0012)

R Core Team, 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Razafindratsima, O.H., Mehtani, S., Dunham, A.E., 2013. Extinctions, traits and phylogenetic community structure: Insights from primate assemblages in Madagascar. Ecography 36, 047–056. doi:[10.1111/j.1600-0587.2011.07409.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.07409.x)

Ricklefs, R.E., 1987. Community diversity: relative roles of local and regional processes. Science 235, 167–171. doi:[10.1126/science.235.4785.167](https://doi.org/10.1126/science.235.4785.167)

Robinet, C., Suppo, C., Darrouzet, E., 2016. Rapid spread of the invasive yellow-legged hornet in France: the role of human-mediated dispersal and the effects of control measures. Journal of Applied Ecology. doi:[10.1111/1365-2664.12724](https://doi.org/10.1111/1365-2664.12724)

Säterberg, T., Sellman, S., Ebenman, B., 2013. High frequency of functional extinctions in ecological networks. Nature 499, 468–70. doi:[10.1038/nature12277](https://doi.org/10.1038/nature12277)

Schoener, T.W., 2011a. The Newest Synthesis : Understanding Ecological Dynamics. Science 331, 426–429. doi:[10.1126/science.1193954](https://doi.org/10.1126/science.1193954)

Schoener, T.W., 2011b. The newest synthesis: understanding the interplay of evolutionary and ecological dynamics. Science (New York, N.Y.) 331, 426–9. doi:[10.1126/science.1193954](https://doi.org/10.1126/science.1193954)

Sexton, J.P., McIntyre, P.J., Angert, A.L., Rice, K.J., 2009. Evolution and Ecology of Species Range Limits. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 40, 415–436. doi:[10.1146/annurev.ecolsys.110308.120317](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120317)

Simberloff, D.S., 1974. Equilibrium Theory of Island Biogeography and Ecology. Annual Review of Ecology and Systematics 5, 161–182. doi:[10.1146/annurev.es.05.110174.001113](https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.001113)

Simberloff, D.S., Wilson, E.O., 1969. Experimental Zoogeography of Islands: The Colonization of Empty Islands. Ecology 50, 278–296. doi:[10.2307/1934856](https://doi.org/10.2307/1934856)

Simberloff, D.S., Wilson, E.O., 1969. Experimental zoogeography of islands: a model for insular colonization. Ecology 50, 296–314. doi:[10.2307/1934856](https://doi.org/10.2307/1934856)

Springer, A., Swann, D., Crimmins, M., 2015. Climate change impacts on high elevation saguaro range expansion. Journal of Arid Environments 116, 57–62. doi:[10.1016/j.jaridenv.2015.02.004](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.02.004)

Stein, A., Gerstner, K., Kreft, H., 2014. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. Ecology Letters n/a–n/a. doi:[10.1111/ele.12277](https://doi.org/10.1111/ele.12277)

Tao, T., Vu, V., Krishnapur, M., 2010. Random matrices: Universality of ESDs and the circular law. The Annals of Probability 38, 2023–2065. doi:[10.1214/10-AOP534](https://doi.org/10.1214/10-AOP534)

Thuiller, W., Münkemüller, T., Lavergne, S., Mouillot, D., Mouquet, N., Schiffers, K., Gravel, D., 2013. A road map for integrating eco-evolutionary processes into biodiversity models. Ecology Letters 16, 94–105. doi:[10.1111/ele.12104](https://doi.org/10.1111/ele.12104)

Tingley, M.W., Monahan, W.B., Beissinger, S.R., Moritz, C., 2009. Birds track their Grinnellian niche through a century of climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106 Suppl, 19637–43. doi:[10.1073/pnas.0901562106](https://doi.org/10.1073/pnas.0901562106)

Vanbergen, A.J., 2013. Threats to an ecosystem service: Pressures on pollinators. Frontiers in Ecology and the Environment 11, 251–259. doi:[10.1890/120126](https://doi.org/10.1890/120126)

Villemant, C., Barbet-Massin, M., Perrard, A., Muller, F., Gargominy, O., Jiguet, F., Rome, Q., 2011. Predicting the invasion risk by the alien bee-hawking Yellow-legged hornet Vespa velutina nigrithorax across Europe and other continents with niche models. Biological Conservation 144, 2142–2150. doi:[10.1016/j.biocon.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.04.009)

Villemant, C., Haxaire, J., Streito, J., 2006. Premier bilan de l’invasion de Vespa velutina Lepeletier en France (Hymenoptera, Vespidae). Bulletin de la Société entomologique de France 111, 535–538.

Waldrop, M.M., 2016. The hundred-year quest for gravitational waves — in pictures. Nature. doi:[10.1038/nature.2016.19340](https://doi.org/10.1038/nature.2016.19340)

Wallace, A.R., 1881. Island Life: Or, The Phenomena and Causes of Insular Faunas and Floras, Including a Revision and Attempted Solution of the Problem of Geological Climates. Harper & brothers.

Wallace, A.R., 1860. On the Zoological Geography of the Malay Archipelago. Journal of the Proceedings of the Linnean Society of London. Zoology 4, 172–184. doi:[10.1111/j.1096-3642.1860.tb00090.x](https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1860.tb00090.x)

Wallace, A.R., 1858. On the Tendency of Varieties to depart indefinitely from the Original Type. Proceedings of the Linnean Society Of London 3, 53–62.

Yoshida, T., Jones, L.E., Ellner, S.P., Fussmann, G.F., Hairston, N.G., 2003. Rapid evolution drives ecological dynamics in a predator-prey system. Nature 424, 303–6. doi:[10.1038/nature01767](https://doi.org/10.1038/nature01767)

1. Wallace a publié en 1858 un article *On the Tendency of Varieties to Depart Indefinitely From the Original Type* qui témoigne très clairement que ses idées sur les varitions temporelles des espèces étaient très proche de celle de Charles Robert Darwin a qui il avait d'ailleurs envoyé le manuscipt (Wallace, 1858). [↑](#footnote-ref-23)
2. L'âge de la terre est très débattu à l'époque bien que de nombreux s'accore que les 6000 ans biblique sont insuffisant, Wallace avance, audacieusemnt, l'age de 500 milians d'année. [↑](#footnote-ref-24)
3. Cet actuel professeur émérite à l'université d'Harvard est reconnu pour ces apport en biologie et en sociologue, il est l'auteur de 32 livres mais c'est pour son immense connaissance des fourmis que j'ai choisi l'adjectif de myrmécologue. [↑](#footnote-ref-25)
4. Changements accompagnés, entre autres, de l'utilisaion parfois massive de pesticide de la famille des néonicotinoïdes affaiblissant les colonies. [↑](#footnote-ref-29)
5. On peut trouver une variante énonçant que les économistes ont pédit 12 des trois dernières crises économiques. Je pense qu'au point de vue de la qualité des prédictions en biogéogrpahie, nous nous apparentons plus aux economistes qu'aux physiciens. [↑](#footnote-ref-32)
6. Il s'agit de la plante modèle par excellence le génome le permier à être séquencé chez les plantes (Arabidopsis Genome Initiative, 2000). [↑](#footnote-ref-34)
7. Pour plus de détail au bulletin du CERN [http://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2012/28/News%20Articles/1459456?ln=fr][http://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2012/28/News%20Articles/1459456?ln=fr] [↑](#footnote-ref-36)
8. En 1957, Hutchinson propose de voir la niche écologique comme un hyperespace (un espace d'un grand nombre de dimension) dans lequel une espèce peut se développer. Le problème est de savoir quelles sont les dimensions et notamment si les autres espèces sont parmis ces dimension. Une tentative a été proposé de parler de la niche comme une espace ou le taux de croissance net est supérieur à 0 (**???**) malgré l'aspect plus quantitatif, le problème est de trouver une méthode gén.rale pour le calculer. [↑](#footnote-ref-41)
9. En echo actuel Wilson se base sur cette relation pour savoir la portion de la terre à préserver [http://www.nytimes.com/2016/03/13/opinion/sunday/the-global-solution-to-extinction.html][http://www.nytimes.com/2016/03/13/opinion/sunday/the-global-solution-to-extinction.html]. [↑](#footnote-ref-50)