

Projet Recherche Innovation 2025-2026

Modélisation de la réponse au changement climatique du complexe d'espèces *Podarcis* *iberica*



Podarcis bocagei, par D. Panaitescu

**Modélisation de la réponse au changement
climatique du complexe d'espèces *Podarcis
iberica* : Vulnérabilité climatique de *P.
Bocagei* et *P. Hispanicus***

Dorian Rumeau

Guillaume Rio

2026

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet recherche innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet recherche innovation (PRI) situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon tuteur de PRI Dorian Rumeau, pour le temps qu'il m'a accordé, ses explications sur les points techniques mais également pour son aide pour fournir un travail scientifique. Son accompagnement m'a permis de progresser et de bien comprendre toutes les notions que j'ai pu appréhender lors de ce projet. Je tiens également à le remercier pour le projet qu'il m'a proposé, pour lequel j'ai trouvé un réel intérêt et qui m'a permis d'identifier ce que je souhaitais faire suite à mes études.

Je tiens également à remercier Polytech Tours qui met en place ce format de projet. J'ai trouvé cette expérience très enrichissante. Ce projet nous permet de nous familiariser avec les méthodes de recherches et de travail scientifique. Je souhaite également remercier Polytech Tours pour m'avoir permis de réaliser mon dernier semestre d'études au sein du Département d'Aménagement et d'Environnement, afin de mener à bien mon projet professionnel.

SOMMAIRE

1. Introduction.....	1
<i>Impact du réchauffement climatique sur les niches écologiques</i>	<i>1</i>
<i>Sensibilité des ectothermes au réchauffement climatique</i>	<i>1</i>
<i>Les lézards face au changement climatique</i>	<i>1</i>
<i>Modèle de distribution d'espèce (SDM).....</i>	<i>2</i>
<i>Le complexe d'espèces Podarcis iberica</i>	<i>2</i>
<i>Podarcis hispanicus</i>	<i>3</i>
<i>Podarcis bocagei.....</i>	<i>3</i>
2. Matériels et méthodes.....	3
<i>Zone d'étude.....</i>	<i>3</i>
<i>Données biologiques.....</i>	<i>3</i>
<i>Modélisation de la distribution des espèces</i>	<i>3</i>
<i>Variables bioclimatiques</i>	<i>4</i>
<i>Scénarios climatiques futurs.....</i>	<i>5</i>
<i>Paramètres de modélisation.....</i>	<i>5</i>
3. Résultats.....	6
<i>Distribution actuelle des espèces.....</i>	<i>6</i>
<i>Importance des variables bioclimatiques</i>	<i>6</i>
<i>Projections futures de distribution</i>	<i>7</i>
<i>Évolution des niches climatiques</i>	<i>7</i>
<i>Combinaison des niches des deux espèces</i>	<i>8</i>
4. Discussion.....	9
<i>Évolution de la compétition entre les espèces.....</i>	<i>9</i>
<i>Limites de l'étude.....</i>	<i>9</i>
<i>Conservation de l'espèce</i>	<i>10</i>
<i>Perspectives à venir</i>	<i>10</i>
5. Conclusion	10
6. Bibliographie	11
7. Annexes.....	13

1. Introduction

Impact du réchauffement climatique sur les niches écologiques

Le réchauffement climatique est une menace actuelle pour les espèces terrestres et aquatiques. Concernant les espèces terrestres, il modifie leur aire de répartition en fonction des latitudes ou encore de l'altitude, afin de maintenir des conditions climatiques adaptées à leur survie (Lenoir et al. 2020). La modification des températures et des régimes de précipitations engendre des changements importants dans la distribution et l'abondance des espèces (Parmesan & Yohe, 2003 ; IPCC, 2021). Les niches écologiques, correspondant aux conditions biotiques et abiotiques permettant la survie d'une espèce sont fortement impactées par le réchauffement climatique (Hutchinson, 1957 ; Soberón, 2007). Cette modification des aires de distribution impacte les espèces en contractant ou en fragmentant leur niche écologique, allant parfois jusqu'à des disparitions locales des espèces (Thomas et al., 2004 ; Urban, 2015). Dans ce contexte, l'étude de l'évolution des niches écologiques en fonction de différents scénarios est devenue un enjeu majeur pour la protection et la conservation des espèces.

Sensibilité des ectothermes au réchauffement climatique

Par définition, les ectothermes sont dépendants du milieu dans lequel ils se trouvent. Ils ne peuvent pas réguler leur température interne indépendamment de la température externe, leur métabolisme et leur survie dépend donc de la température externe, ce qui les rend particulièrement sensible au réchauffement climatique (Huey et al., 2012).

Le réchauffement climatique impacte les ectothermes avec l'augmentation des températures qui peut dépasser les seuils thermiques optimaux ou critiques (Deutsch et al., 2008). De plus l'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur continues peut limiter les périodes d'activités, d'alimentation ou encore de reproduction (Kearney et al., 2009).

Les lézards face au changement climatique

Les lézards sont des ectothermes, par conséquent ils sont donc extrêmement sensibles au réchauffement climatique. De plus, la majorité des espèces de lézards ont de faibles capacités de dispersion, ce qui augmente leur vulnérabilité face aux impacts du changement climatique (Huey et al., 2010). Plusieurs études ont déjà mis en évidence le déclin de certaines espèces avec le réchauffement climatique. Une étude réalisée par Sinervo et al., a notamment permis de mettre en avant la diminution de la fitness des individus, entraînant une diminution des populations. Ces effets sont particulièrement extrêmes dans la région méditerranéenne, où les températures peuvent être amenées à dépasser les seuils critiques (Buckley et al., 2013). De plus la diminution des précipitations associées au changement climatique vient perturber les espèces favorisant les endroits humides comme niche écologique (García-Porta et al., 2019).

Modèle de distribution d'espèce (SDM)

Face au réchauffement climatique, de nombreuses études cherchent à modéliser l'évolution des niches écologiques sensibles aux modifications climatiques. Pour cela, des modèles de distribution d'espèce ont été mis en place. Ces modèles permettent de projeter la distribution future des espèces en fonction de leur répartition actuelle. Ils reposent sur des calculs statistiques entre les individus observés et les variables bioclimatiques associées (Guisan & Zimmermann, 2000). Les SDM sont particulièrement efficaces pour projeter l'évolution des niches écologiques dans le temps. Cependant, ils supposent que la relation entre les variables bioclimatiques et les espèces reste stable dans le temps, ce qui est le cas pour de nombreux ectothermes. Les méthodes statistiques sont différentes en fonction des modèles utilisés mais les résultats sont généralement assez proches et permettent d'avoir une première projection. Chez les ectothermes, les SDM se sont révélés assez efficace pour identifier les variables

bioclimatiques impactantes (Sinervo et al., 2010).

Le complexe d'espèces *Podarcis iberica*

Le complexe d'espèces *Podarcis iberica* regroupe un ensemble d'espèces de *Podarcis* dans la péninsule ibérique. Ils se distinguent par leur diversité écologique et génétique (Carranza et al., 2004). Les études génétiques ont permis de montrer une forte similarité entre les espèces malgré une diversité régionale, ce qui laisse croire que les espèces se sont adaptées aux conditions climatiques environnantes (García-Porta et al., 2019). D'un point de vue écologique toutes les espèces occupent des zones distinctes pouvant être très proche comme le montre la figure ci-dessous (José Martín & Pilar López, 2015). Dans notre étude, le *P. hispanicus* correspondra à *P. h. GALERA* illustré sur la carte. Cette divergence écologique laisse penser qu'il y a une spécialisation écologique au sein de ce complexe.

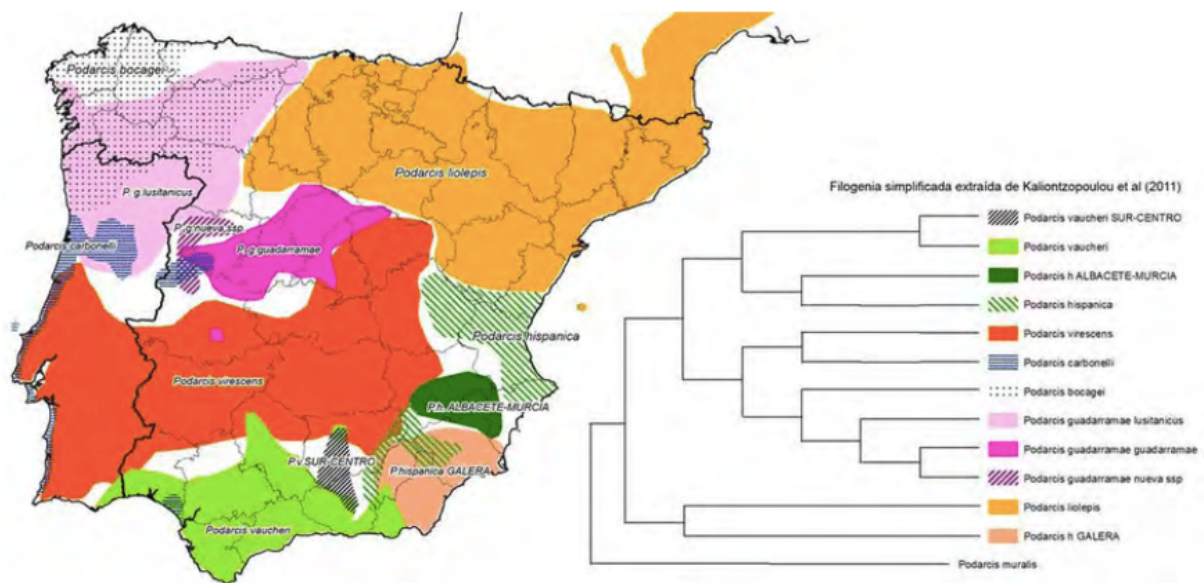


Figure 1 : Modélisation de la distribution actuelle du complexe *Podarcis iberica* et distance génétique entre les espèces.

Podarcis hispanicus

Podarcis hispanicus est une espèce du complexe *P. iberica*. Comme le montre la carte (figure 1), cette espèce se situe au Sud-Est de la péninsule ibérique. Les individus mesurent généralement entre 50 et 70 mm de longueur et possède un corps plus petit que leur queue (Ortega, 2015).

Comme l'a montré Ortega dans une publication de 2015, le *P. hispanicus* se différencie bien des autres espèces du complexe sur le plan génétique. Cette différence est également visible sur la figure 1. Cette espèce est isolée des autres par des zones anthropisées ce qui limite le brassage génétique. Cela se voit également sur la carte par le peu de chevauchement de sa niche écologique avec d'autres espèces.

Podarcis bocagei

Le *P. bocagei* est une espèce de lézard endémique du Nord-Ouest de la péninsule ibérique (figure 1). Elle est considérée comme une espèce distincte du complexe d'espèce, d'un point de vue génétique et écologique. Cette espèce préfère le climat tempéré de la façade Atlantique contrairement au *P. hispanicus*. Elle préfère également les zones humides et abritées contrairement à *P. hispanicus* (García-Porta et al., 2019). Les individus sont légèrement plus grands, avec une taille allant de 55 à 75cm (Pinho et al., 2010).

2. Matériels et méthodes

Zone d'étude

L'étude est réalisée sur la péninsule ibérique, elle couvre l'Espagne, le Portugal et le Sud-Ouest de la France, ce qui correspond à une superficie de 966 939 km². Cette région comporte une forte hétérogénéité climatique liée à la présence

de l'Atlantique d'un côté et de la Méditerranée de l'autre, les gradients altitudinaux influencent également le climat, surtout au niveau des Pyrénées (Lionello et al., 2006). Il est possible d'y retrouver un climat humide au Nord-Ouest et des conditions météorologiques plus sèches et plus chaudes au Sud-Est.

Données biologiques

Cette étude s'appuie sur des données collectées depuis 1870 jusqu'à aujourd'hui. Elle recense toutes les espèces du genre *Podarcis* retrouvée dans la péninsule ibérique et compte 4954 identifications. Il s'agit d'une base de données confidentielles, partagée dans le cadre de la thèse de Dorian Rumeau. Elle recense des individus de toutes les espèces du complexe *Podarcis iberica*. Cette dernière a été triée pour obtenir uniquement des individus de *P. Bocagei* et *P. Hispanicus* recensés entre 1991 et 2023, avec une précision d'un kilomètre. Ce qui a permis d'isoler 620 observations de *P. bocagei* et 116 de *P. Hispanicus*. Ce premier tri permet de rester cohérent spatialement et temporellement, avec les données bioclimatiques utilisées pour la modélisation et pour entraîner les modèles de distribution d'espèces.

Modélisation de la distribution des espèces

Les algorithmes de modélisation de distribution d'espèces permettent de relier la présence d'une espèce aux conditions environnementales (Elith & Leathwick, 2009). Dans cette étude, la présence de *P. bocagei* et de *P. hispanicus* sera associé aux variables bioclimatiques BIO 1, BIO 4, BIO 5, BIO 12 et BIO 15. Il faut sélectionner les bonnes variables bioclimatiques influentes sinon les résultats peuvent être biaisés.

Les modèles ont tous des défauts et des avantages. Pour obtenir des meilleurs résultats prédictifs, il est fortement conseillé d'utiliser des ensembles de modèles, cela permet notamment de réduire le biais spécifique de chaque méthode (Mancini et al., 2025). Pour cette étude, 3 algorithmes ont été utilisés. Le premier est MaxEnt (modélisation à entropie maximale), il est très reconnu pour sa capacité à identifier les données de présence-only. Le second est RF (Random Forest), grâce à son arbre de décision il est très efficace pour gérer les interactions entre les variables (Breiman, 2001). Pour finir l'algorithme GAM (modèle additif généralisé), vient compléter cette sélection, notamment grâce à son aptitude à modéliser des relations non linéaires entre la présence d'espèces et les conditions climatiques (Hastie & Tibshirani, 1990). Finalement, Maxent s'occupe d'identifier les zones de présences exclusives, RF des interactions complexes entre les variables et la présence d'individus et GAM s'occupent des interactions plus complexes à identifier.

Les modèles ont été calibré avec 80% des données de présence et les 20% restant ont permis valider la calibration. Cela permet de produire la répartition actuelle des deux espèces, puis d'identifier les niches écologiques semblables en fonction des variables bioclimatiques dans les scénarios et périodes souhaités.

Variables bioclimatiques

Les variables bioclimatiques représentent les tendances annuelles, la saisonnalité ou encore les facteurs environnementaux ou limitants. Elles sont utilisées pour modéliser des distributions d'espèces, notamment car elles synthétisent les variables bioclimatiques pertinentes qui impacteront la présence ou l'absence de certaines espèces.

Au départ, il y a 11 variables bioclimatiques qui influencent le comportement des lézards (Rozen-Rechels et al. 2019, Žagar et al. 2015). Pour cette étude, cinq variables bioclimatiques ont été sélectionnées : la température moyenne annuelle (BIO 1), la saisonnalité de la température (BIO 4), la température maximale du mois le plus chaud (BIO 5 / Tmax), les précipitations annuelles (BIO 12) et la saisonnalité des saisons (BIO 15).

Les variables thermiques (BIO 1, BIO 4 et BIO 5) sont directement liées à la physiologie des ectothermes, donc des Podarcis, qui dépendent fortement des radiations solaires (Bogert 1949, Žagar et al. 2015). La température maximale du mois joue un rôle important dans la modélisation de la distribution des lézards, il s'agit d'un facteur limitant en raison du risque de stress thermique pouvant engendrer la mortalité des individus. Les variables bioclimatiques BIO 12 et BIO 15 jouent un rôle indirect pour modéliser la répartition des Podarcis, elles permettent notamment d'évaluer les ressources en eau disponible et l'humidité des habitats. Ces variables sont très importantes pour évaluer la persistance des reptiles (Rozen-Rechel et al. 2019).

Cependant, il est important de noter qu'une étude de Sinervo et al., datant de 2010, critique l'utilisation des variables bioclimatiques pour modéliser l'impact du changement climatique sur les lézards. Selon cette étude, les variables bioclimatiques n'illustrent pas les contraintes physiologiques que subissent les ectothermes.

Les variables bioclimatiques ont donc été extraites sur la période de 1991 à 2023 pour correspondre à la sélection de *Podarcis* recensés. Elles sont extraites avec une résolution de 1km, pour conserver la précision des rasters, puis découpées pour ne garder que la zone d'étude et limiter les calculs.

Scénarios climatiques futurs

Pour pouvoir modéliser les projections futures de ces deux espèces, il faut choisir des scénarios climatiques. Pour cette étude, il a été convenu d'utiliser les scénarios SSP 126 (Shared Socio-economic Pathways) et SSP 585. Il s'agit de scénarios mis en place par le GIEC (Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'évolution du Climat). Ces scénarios permettent de simuler l'évolution des variables bioclimatiques en fonction du réchauffement climatique.

Le premier scénario correspond à une limite du réchauffement climatique. Ce scénario affiche une augmentation des températures de moins de 2°C d'ici à 2100, avec une légère baisse des températures avant 2100. Le scénario pessimiste projette une augmentation des températures de 4 à 5°C d'ici la fin du siècle. Les modèles climatiques vont être fortement impactés ainsi que les variables bioclimatiques. Ce scénario permet de visualiser les risques de pertes d'habitat et de visualiser si de nouveaux habitats seront adaptés aux espèces.

Les projections climatiques de ces deux scénarios ont été extraites sur WorldClim, avec une résolution de 1km. Les SDM pourront alors modéliser les projections futures en comparant la situation actuelle avec les scénarios futurs et en identifiant les zones similaires en fonction des variables bioclimatiques.

Paramètres de modélisation

Pour utiliser les modèles de distribution il faut passer par le package BIOMOD2 sur R. Étant donné qu'une précision d'un kilomètre a été appliquée sur la base de données, elle a permis de définir une résolution d'un kilomètre pour la projection. Cela signifie que chaque pixel des rasters correspondra à un kilomètre.

Pour chaque espèce, il a fallu générer aléatoirement cinq jeux de pseudo-absences, chaque jeu possède le même nombre de pseudo-absences qu'il y a de présences. Ensuite les modèles sont calibrés en utilisant 15 répétitions de validation croisée aléatoire, ainsi 80% des données sont utilisées pour la calibration et 20% pour l'évaluation. Suite à cela, il a fallu évaluer les performances des modèles en utilisant les métriques « ROC », « Kappa » et « TSS ». Elles permettent d'évaluer la capacité des modèles à discriminer les conditions favorables ou défavorables à la présence des espèces. L'importance des variables environnementales est estimée à partir de 3 permutations par variables. Enfin, il a fallu construire des modèles d'ensemble en combinant les modèles avec des performances suffisantes. Ces projections ont été réalisées avec les scénarios SSP126 et SSP 585, sur les périodes 2041-2070 et 2071-2100.

Pour finir, les rasters ont été binarisés avec un seuil de 70%, ce qui a permis de les comparer entre eux pour visualiser l'évolution des niches écologiques et de combiner les projections des deux espèces ensemble.

3. Résultats

Distribution actuelle des espèces

Après avoir trié la base de données, il a fallu modéliser la distribution actuelle des 620 individus de *P. Bocagei* et 116 de *P. Hispanicus*. La distribution actuelle est illustrée avec les cartes en haut à gauche des annexes 1 et 2. Les points rouge correspondent aux individus recensés et utilisés pour faire tourner les modèles, les zones jaunes sont les zones avec une forte probabilité de présence de l'espèce. Tandis que les zones bleues correspondent aux zones non adaptées pour cette espèce, les variables bioclimatiques ne seront pas adaptées pour la survie de l'espèce. Cette distribution montre une vraie séparation entre les niches écologiques de ces deux espèces. Le *P. Hispanicus* a son aire de répartition au Sud Est de la péninsule ibérique, tandis que le *P. Bocagei* est situé sur la côte Nord-Ouest du Portugal. L'aire de répartition de *P. Bocagei* est bien plus distincte que celle de *P. Hispanicus* qui semble moins nette et semble se prolonger à des endroits où aucun individu n'a été identifié. Cela peut s'expliquer par la différence d'individus identifiés entre ces deux espèces. Il est également envisageable que la topographie du terrain bloque les individus mais également que l'activité anthropique ou l'absence de corridors écologiques, empêche les individus de se déplacer dans des zones où le climat leur est favorable. Ces facteurs n'ayant pas été pris en compte dans cette étude. Au vu de la séparation entre ces deux niches écologiques, il est possible de conclure qu'il n'y a pas de compétition actuellement entre ces deux espèces.

Importance des variables bioclimatiques

Les courbes de réponses permettent d'identifier à quelles variables bioclimatiques les deux espèces sont sensibles et les conditions favorables pour leur présence. Dans le cas de *P. Bocagei* et *P. Hispanicus*, il est possible d'observer une vraie différence entre ces courbes (annexes 3 et 4). Elle s'explique notamment par la proximité de *P. Hispanicus* avec la Méditerranée, contrairement à *P. Bocagei* qui préfère le climat Atlantique.

Concernant les courbes de réponse de *P. bocagei*, les variables bioclimatiques BIO 1 et BIO 15 sont quasiment plates, ce qui signifie que la température annuelle et la saisonnalité des saisons n'ont qu'une faible influence sur la probabilité de présence de *P. bocagei*. La variable BIO 4 montre que la probabilité de présence diminue lorsque l'amplitude thermique augmente. Avec la variable BIO 5, il est possible d'identifier la température maximale favorable à la présence de cette espèce, dans le cas de *P. bocagei*, la courbe est relativement stable avant de chuter autour de 22°C, donc cette espèce préfère les zones avec des températures inférieures à 22°C. Pour finir, la courbe de saisonnalité des saisons augmente nettement après 1500mm, ce qui montre que le *P. bocagei* préfère les environnements humides.

Pour ce qui est des courbes de réponses de *P. hispanicus*, aucune d'entre elles n'est relativement plate comme pour *P. bocagei*, ce qui signifie que cette espèce aura une préférence particulière pour chaque variable bioclimatique. Dans un premier temps, il est possible d'observer une augmentation de la courbe de la variable BIO 1 autour de 12°C, ce qui signifie que cette espèce préfère lorsque la température annuelle moyenne est supérieur à 12°C. Ensuite, la courbe de réponse de la variable BIO 4 diminue lorsque les amplitudes thermiques sont trop

importantes, ce qui impactera la présence de cette espèce. La courbe de BIO 12 permet de montrer que *P. hispanicus* préfère les zones avec moins d'humidité annuelle, toutefois avec une humidité saisonnalité des précipitations entre 40 et 60%. Pour ce qui est de la température maximale du mois le plus chaud, il est possible d'observer une légère augmentation après 25°C, ce qui favorisera la présence de *P. hispanicus*.

Les courbes de réponses affichent une nette différence entre ces deux espèces. *P. bocagei* avec de l'humidité, des précipitations et pas trop chaud, tandis que *P. hispanicus* préfère les zones moins humides et avec des températures plus élevées. Ce qui s'explique notamment par la présence des espèces sur la côte Méditerranéenne ou la façade Atlantique.

Le diagramme en boîte à moustache montre que la variable bioclimatique 12 est importante à hauteur de 30% pour la présence de *P. hispanicus*. Tandis que toutes les autres variables bioclimatiques sont autour de 10%. Pour le *P. bocagei*, le diagramme montre que les variables BIO 4 et BIO 12 sont les plus influentes sur la probabilité de présence, avec des valeurs entre 20 et 15%, ensuite les variables BIO 15 et BIO 5 sont importantes à hauteur de 10%.

Projections futures de distribution

Pour évaluer l'impact du réchauffement climatique sur la distribution des espèces de Podarcis, les modèles ont été projetés sur les scénarios futurs. Afin d'évaluer les différentes possibilités, deux périodes et deux scénarios ont été sélectionnés pour modéliser l'évolution des niches climatiques. Les cartes de projection (annexes 1 et 2), permettent de visualiser cette évolution. Ces cartes ont la même échelle que pour la distribution actuelle. En haut, il y a les deux scénarios pour la

période 2041-2070 et en bas les scénarios SSP126 et SSP585 pour la période suivante. Pour les deux espèces, il est possible d'observer une nette diminution des niches écologiques pour les années 2041 à 2070, que ça soit avec le scénario SSP126 et SSP585. La différence entre ces scénarios n'est pas très importante pour cette période. Néanmoins, le scénario SSP126 montre une stabilisation des niches écologiques entre les deux périodes. Contrairement au scénario SSP585, où il est possible d'observer une importante diminution des niches écologiques entre les deux périodes.

Évolution des niches climatiques

Pour modéliser l'évolution des niches climatiques des deux espèces en fonction des différents scénarios, il a fallu binariser les rasters des projections futures (annexes 5 et 6). La binarisation des rasters permet également de mieux distinguer les niches écologiques, avec des limites nettes et non un dégradé de couleur. Pour cela, il a été convenu que lorsque la probabilité de présence est supérieure à 70%, il y a présence de l'espèce. Ainsi, les projections futures binarisées ont été comparées et ont permis de faire le calcul de la surface gagnée, perdue et stable pour chaque espèce et chaque prévision. Les cartes annexes 7 et 8 permettent de visualiser ces évolutions. Les zones en rouge correspondent à la surface de niche écologique perdue, en jaune la surface conservée et en vert les nouvelles niches écologiques envisageables. Comme vu précédemment, il n'y pas de différence importante entre les deux scénarios sur la première période, les pertes de niche écologique semblent être équivalentes, et ce pour les deux espèces. Cependant, sur la période allant de 2071 à 2100, il est possible de constater une augmentation de perte de niche écologique avec le scénario SSP585, tandis que le scénario SSP126 montre une augmentation des gains de niche écologique.

Pour mieux visualiser ces évolutions, des pourcentages ont été réalisés (annexes 9 et 10). Ils montrent que dans le pire des scénarios, la superficie de la niche écologique diminue de plus de 50% sur les deux périodes étudiées. Il est possible de constater que le *P. bocagei* sera le plus impacté par cette diminution, avec une perte allant jusqu'à 78,4%, contrairement au *P. hispanicus* qui perdra 64%. Cependant dans le scénario SSP126 et sur la deuxième période, il s'agit de l'espèce qui permet moins de superficie de niche écologique 35,6% contre 36,6% et qui en gagne le plus 19,5% contre 7,1%.

Suite à cela, un tableau permettant de représenter ces pourcentages sous forme de superficies (en km²) a été réalisé (table 1). Il affiche la surface des pertes et gagnées pour les niches écologiques de *P.*

Bocagei et *P. hispanicus* pour chaque période et les deux scénarios. Il permet donc de compléter les diagrammes et compare la superficie finale (stable + gain) de chaque scénario avec la superficie initiale. Comme vu précédemment, la superficie des niches écologiques des deux espèces ne varie pas trop entre les deux scénarios sur la première période. Cependant, le tableau ci-dessous montre que la niche écologique va s'agrandir entre les deux périodes avec le scénario optimiste. Ce qui s'explique par le scénario SSP126 qui modélise une diminution des températures après avoir atteint un plateau autour des années 2070. Néanmoins, la niche climatique des deux espèces restera moins grande qu'à l'état initial. Dans le pire des scénarios, la niche écologique de *P. bocagei* aura diminué d'environ 75% et moins de 30% pour *P. hispanicus*.

			Perte	Stable	Gain	Superficie initiale	Superficie finale
P. Bocagei	2041-2070	SSP126	35 524	12 962	10 028	48 486	22 990
		SSP585	34 247	14 239	7 820		22 059
	2071-2100	SSP126	23 916	24 570	13 447		38 017
		SS585	41 083	7 403	3 850		11 253
P. hispanicus	2041-2070	SSP126	9 593	23 659	1 525	33 252	25 184
		SSP585	11 172	22 080	2 139		24 219
	2071-2100	SSP126	7 515	25 737	3 863		29 600
		SS585	10 891	22 361	2 543		24 904

Table 1 : Évolution de la superficie des niches climatiques des deux espèces en fonction des scénarios et des périodes.

Combinaison des niches des deux espèces

Lorsque les rasters des deux espèces sont combinés, il n'y a aucune surface de commune entre celles-ci, peu importe le scénario. Dans le meilleur des scénarios, il est possible d'observer une première diminution des surfaces associées à chaque espèce mais ensuite elles reprennent de la surface. La figure ci-dessous représente

l'évolution des deux niches climatiques en fonction des différents scénarios et des différentes périodes. La niche du *P. bocagei* est identifiable en vert et celle du *P. hispanicus* en orange. Dans le scénario le plus pessimiste, les niches écologiques vont fortement diminuer et légèrement se déplacer, à l'Est pour le *P. Bocagei* et au Nord pour *P. hispanicus* mais cela ne compensera pas les pertes de surfaces.

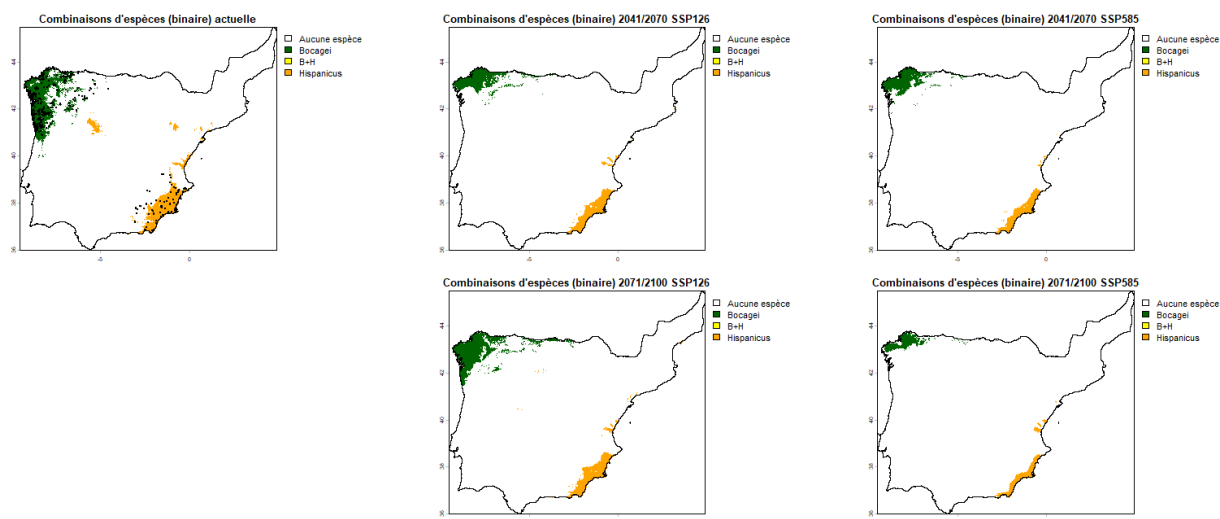


Figure 2 : Modélisation de la distribution actuelle et projection de la distribution future de *P. Bocagei* et *P. Hispanicus*.

4. Discussion

Évolution de la compétition entre les espèces

Cette étude ne prend en compte que deux espèces du complexe de neuf espèces. La distribution actuelle des espèces de *P. bocagei* et *P. hispanicus* montre une séparation distincte entre les deux espèces. L'une se trouve au Nord-Ouest de la péninsule ibérique et l'autre au Sud-Est. Ce qui confirme qu'il n'y a pas de compétition actuellement. Cependant, au vu de la distance initiale entre les niches écologiques et les l'évolution de celles-ci avec le réchauffement climatique, il ne devrait pas y avoir de compétition dans le futur. De plus, les deux espèces ne sont pas sensibles de la même façon aux variables bioclimatiques, ce qui limite fortement la possibilité que leurs niches écologiques se rejoignent dans un quelconque futur. Cependant, il est possible que d'autres espèces non étudiées du complexe entre en compétition avec le réchauffement climatique.

Limites de l'étude

Cette étude ne prend en compte uniquement des données climatiques. La topologie, les obstacles possibles ou encore la dynamique des populations n'est pas prise en compte. Le nombre limité d'individus de *P. hispanicus* peut également biaiser la qualité des résultats. La binarisation avec un seuil de 70% peut également surestimer ou sous-estimer l'évolution des niches écologiques. Finalement, il s'agit donc de définir leurs potentielles niches écologiques dans les différents futurs en fonction de l'évolution du climat. Mais cette étude ne permet pas de conclure sur la possibilité de survie de ces espèces face au réchauffement climatique.

Conservation de l'espèce

Les résultats de cette étude ont permis de montrer que ces espèces sont particulièrement sensibles au réchauffement climatique. Il faudra donc les surveiller de près et essayer de conserver leur habitat en évitant l'anthropisation de ceux-ci. Il sera également favorable de développer des corridors écologiques afin de limiter la fragmentation de l'espèce dans le futur. Ces corridors pourront également permettre aux individus de rejoindre leur niche climatique adaptée en fonction des évolutions à venir.

Perspectives à venir

Cette étude n'est qu'un début dans la modélisation du complexe *Podarcis iberica* face au réchauffement. Elle ne montre qu'une potentielle évolution en négligeant quelques facteurs. Des études complémentaires pourraient être réalisées en ajoutant l'impact de facteurs non climatiques. Des suivis de populations pourraient également être réalisés pour observer comment les individus s'adaptent à ce changement et ainsi identifier des solutions pour faciliter leur adaptation.

5. Conclusion

Cette étude s'intéresse à l'évolution du complexe *P. iberica* face au réchauffement climatique. Dans cette étude, l'évolution des niches écologiques des espèces *P. bocagei* et *P. hispanicus* ont été réalisées avec des modèles de distribution d'espèces. Différentes projections ont été réalisées, en utilisant les scénarios SSP126 et SSP585 sur deux périodes. Dans un premier, la modélisation de la répartition actuelle a permis d'identifier les niches écologiques actuelles des espèces ainsi que les variables bioclimatiques influentes. Ainsi, il a été observé que *P. bocagei* préfère l'humidité et a sa niche écologique au Nord-Ouest de la péninsule ibérique, tandis que, *P. hispanicus* se trouve dans des zones plus sèches au Sud-Est de la péninsule. Suite à cela, les projections de distribution futures ont permis de visualiser une nette diminution des niches écologiques pour le scénario pessimiste. Le scénario optimiste affiche également une réduction de la superficie des niches écologique mais sur le long terme, celles-ci reprennent en surface. La séparation entre les niches écologiques initiales ne laisse place à aucune compétition entre ces deux espèces dans un futur proche. Ces deux espèces vont donc être fortement impactées par le réchauffement climatique et vont devoir faire preuve d'adaptabilité pour survivre.

6. Bibliographie

PARMESAN, C., YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, [en ligne], 2003, 421. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/nature01286> (12/01/2026).

HUTCHINSON, G. E. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, [en ligne], 1957, 22. Disponible sur : <https://www.cshlpress.com/default.tpl?cart=159170832890210> (11/01/2026).

HUEY, R. B., KEARNEY, M. R., KROCKENBERGER, A., et al. Predicting organismal vulnerability to climate warming: roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, [en ligne], 2012, 367. Disponible sur : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2012.0005> (12/01/2026).

DEUTSCH, C. A., TEWKSBNRY, J. J., HUEY, R. B., et al. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [en ligne], 2008, 105(18), Disponible sur : <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0801086105> (10/01/2026).

KEARNEY, M., SHINE, R., PORTER, W. P. The potential for behavioral thermoregulation to buffer “cold-blooded” animals against climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [en ligne], 2009, 106(10). Disponible sur : <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0808913106> (8/01/2026).

SINERVO, B., MÉNDEZ-DE-LA-CRUZ, F., MILES, D. B., et al. Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science*, [en ligne], 2010, 328. Disponible sur : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1184695> (24/01/2026).

BUCKLEY, L. B., HURLBERT, A. H., JETZ, W. Broad-scale ecological implications of ectothermy and endothermy in changing environments. *Global Ecology and Biogeography*, [en ligne], 2013, 21. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/geb.12043> (26/01/2026).

GARCÍA-PORTA, J., et al. Cryptic diversity and diversification processes in Iberian wall lizards. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, [en ligne], 2019, 131. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S105579031930184X> (5/01/2026).

GUISAN, A., ZIMMERMANN, N. E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, [en ligne], 2000, 135. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380000001688>(28/01/2026).

DORMANN, C. F., et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, [en ligne], 2012, 35(1). Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0587.2011.07348.x> (10/01/2026).

CARRANZA, S., ARNOLD, E. N., MATEO, J. A. DNA phylogeny of the Iberian wall lizard complex (*Podarcis hispanicus*): molecular evidence for cryptic species. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, [en ligne], 2004, 33. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1055790304001262> (21/01/2026).

PINHO, C., et al. Evolutionary history of Iberian wall lizards: genetic structure and colonization patterns. *Molecular Ecology*, [en ligne], 2010, 19. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-294X.2010.04686.x> (12/01/2026).

BREIMAN, L. Random Forests. *Machine Learning*, [en ligne], 2001, 45. Disponible sur : <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324> (13/01/2026).

HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. *Generalized Additive Models*. London : Chapman & Hall, 1990.

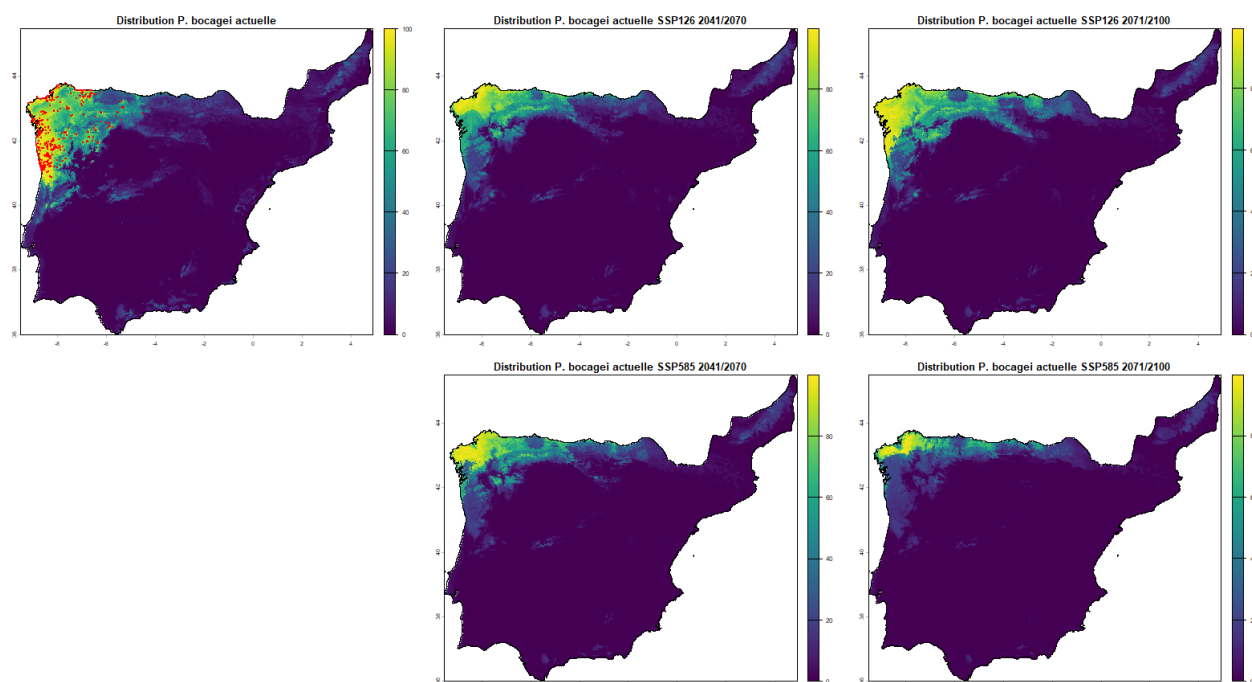
ORTEGA, J. Determinants of phenotypic variation in the Iberian wall lizard species complex (*Podarcis hispanicus*). [en ligne]. Thèse de doctorat : Biologie. Madrid : Universidad Complutense de Madrid, 2015, 120. Disponible sur : <https://eprints.ucm.es/id/eprint/XXXX> (14/01/2026).

WORLDCLIM. Bioclimatic variables [en ligne]. Disponible sur : <https://www.worldclim.org/data/bioclim.html> (17/01/2026).

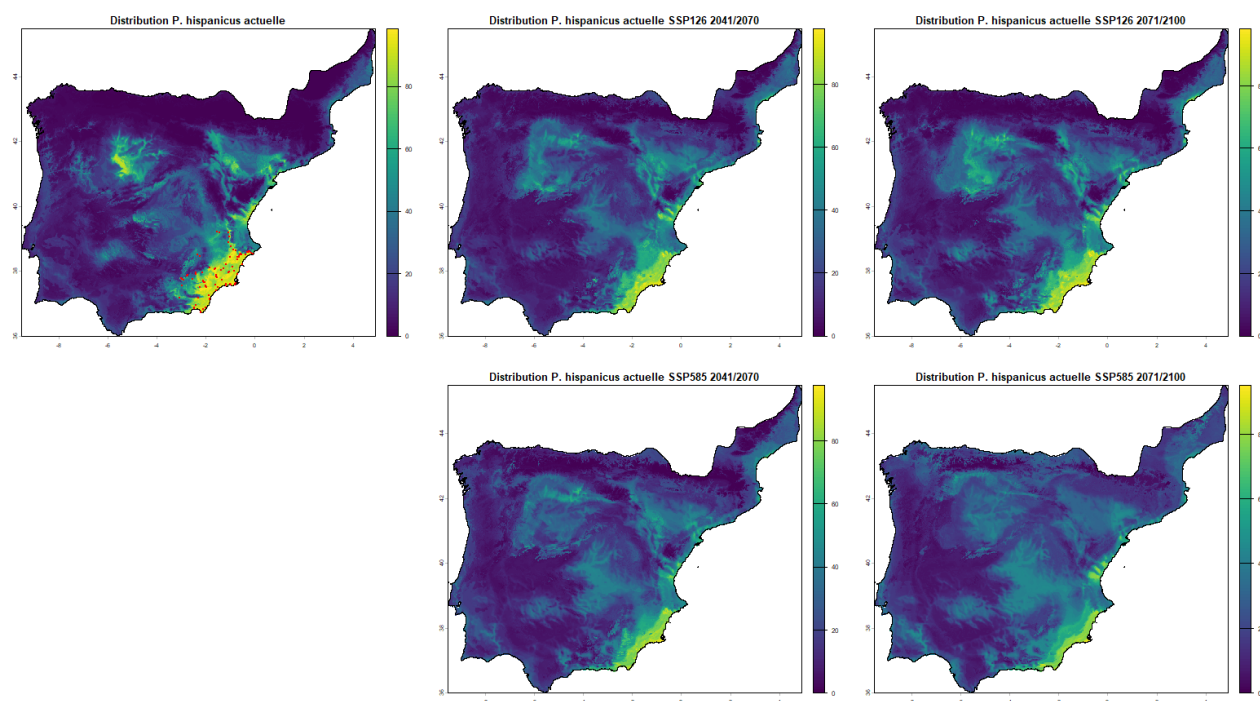
SPRINGER. Chapter on ecological niche modeling [en ligne]. Disponible sur : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-12457-5_6 (28/01/2026).

ONLINELIBRARY.WILEY. Journal article link [en ligne]. Disponible sur : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jbi.70037?af=R&utm_source=chatgpt.com (12/01/2026).

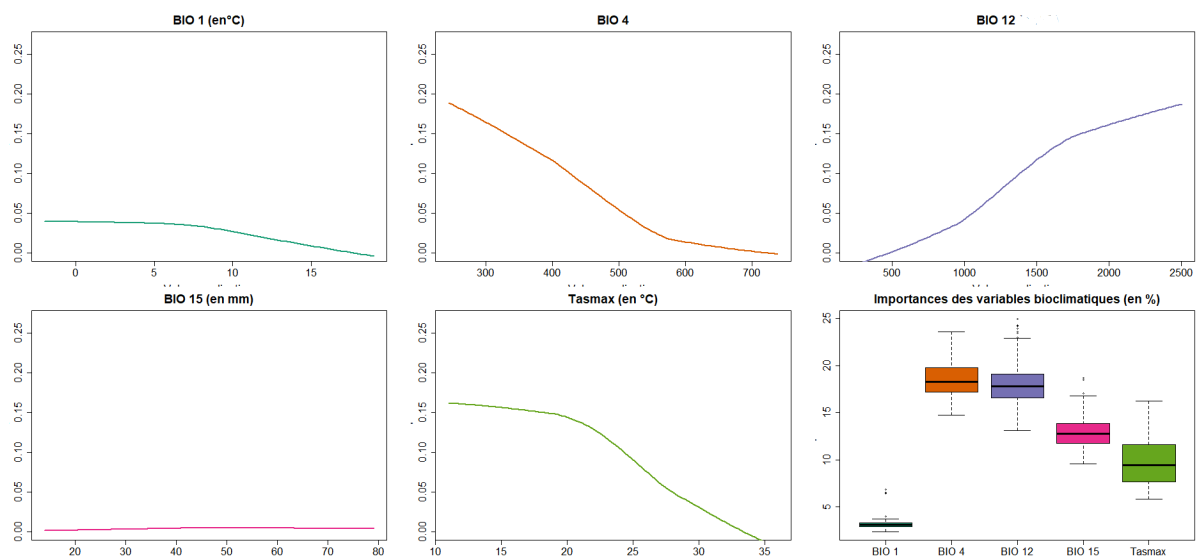
7. Annexes



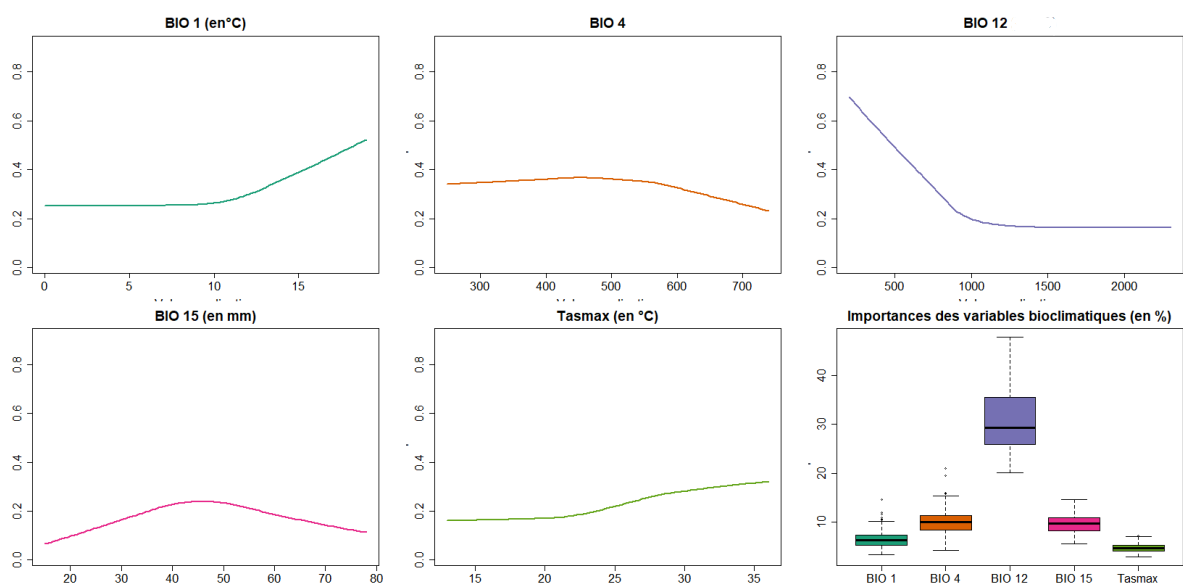
ANNEXE 1 : Modélisation actuelle et projection de la distribution de *P. bocagei* en fonction des différentes périodes et scénarios



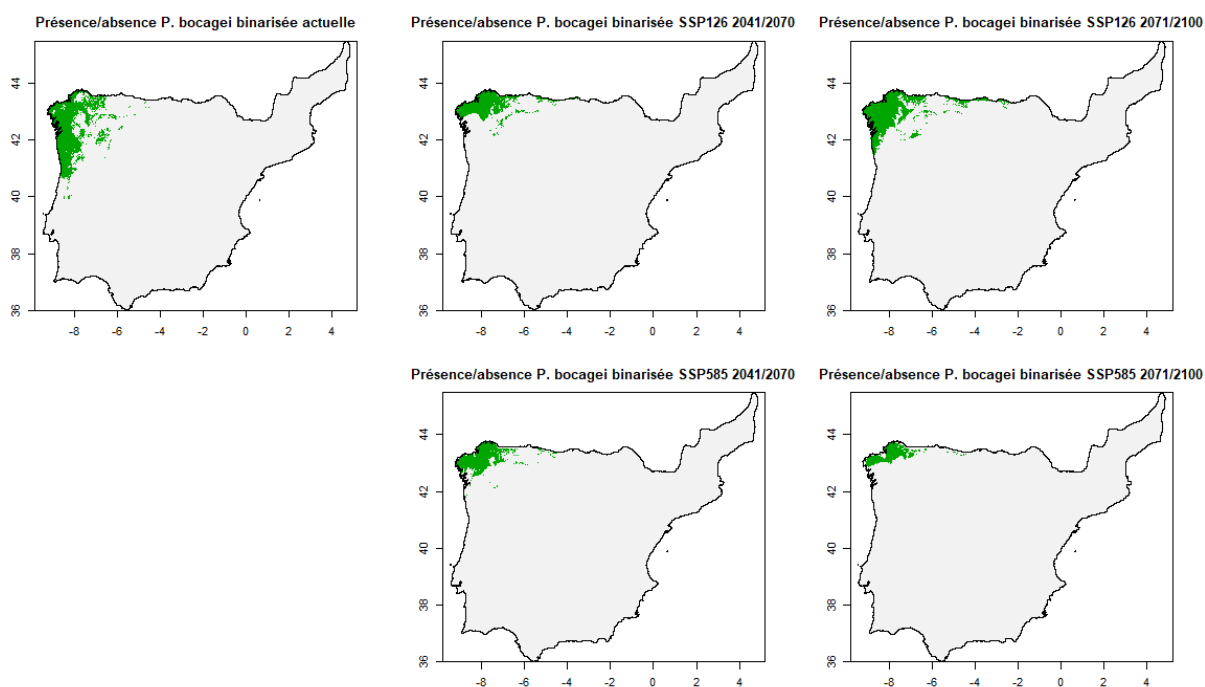
ANNEXE 2 : Modélisation actuelle et projection de la distribution de *P. hispanicus* en fonction des différentes périodes et scénarios



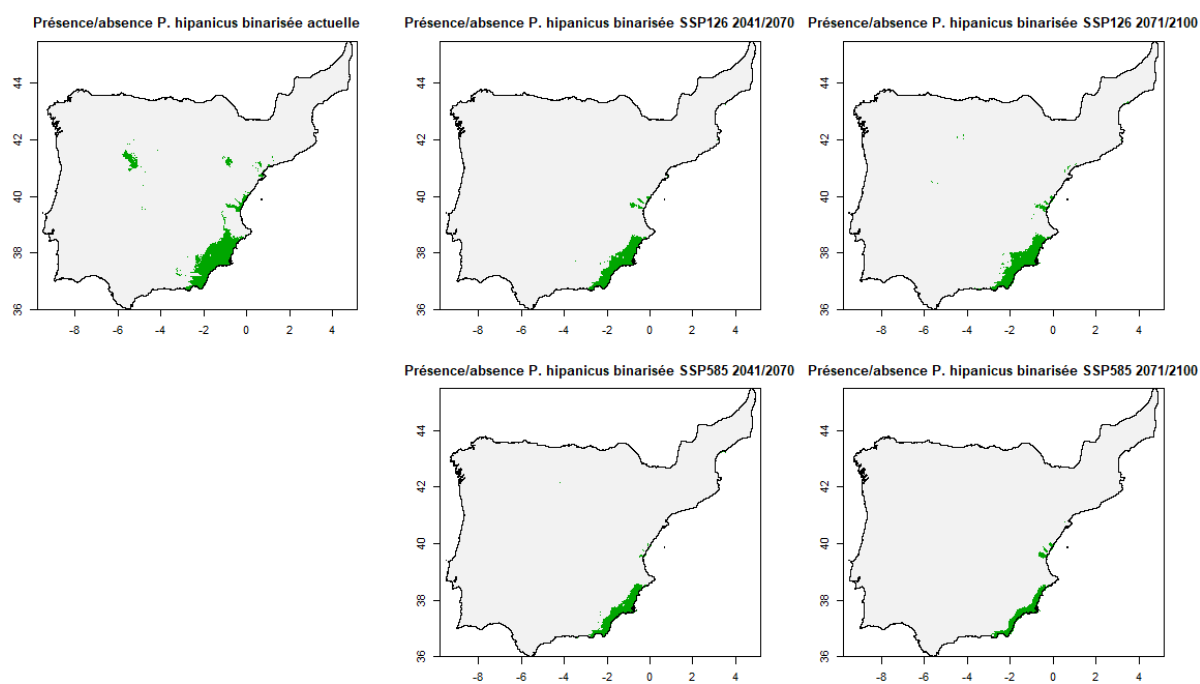
ANNEXE 3 : Courbes de réponse des variables bioclimatiques et graphique en boîte à moustache illustrant leur importance pour *P. bocagei*



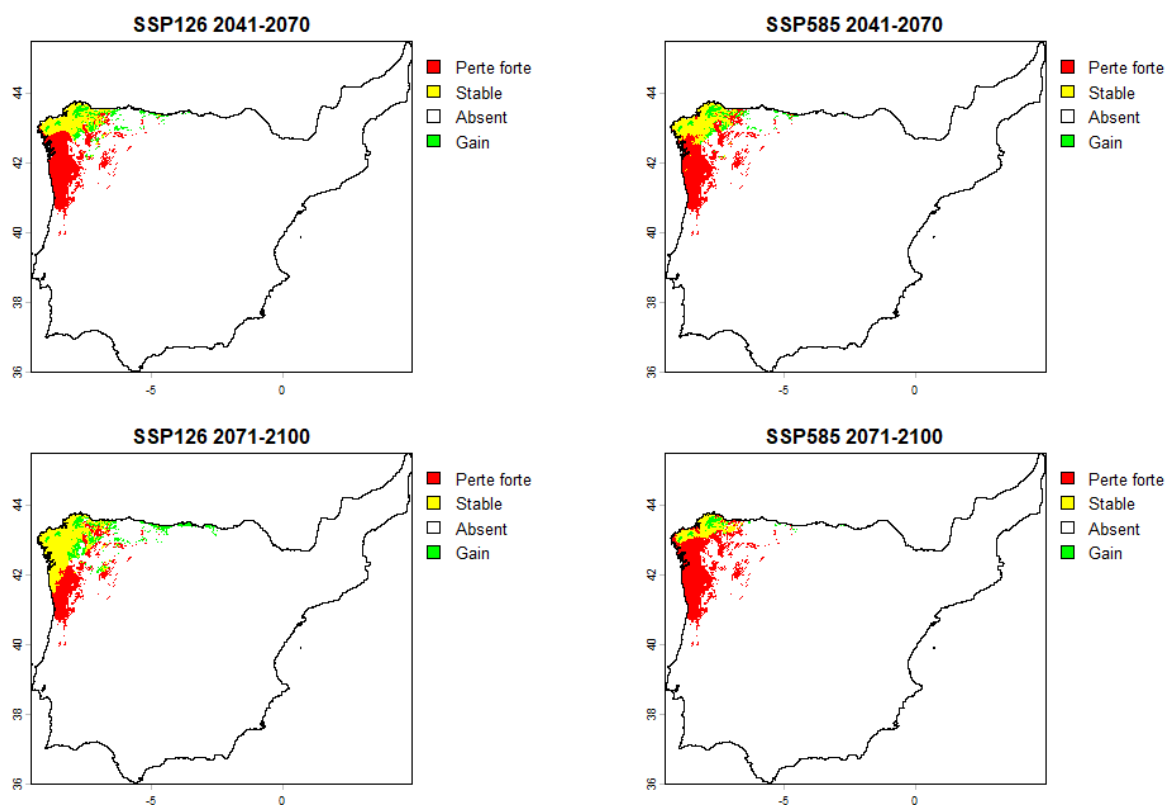
ANNEXE 4 : Courbes de réponse des variables bioclimatiques et graphique en boîte à moustache illustrant leur importance pour *P. hispanicus*



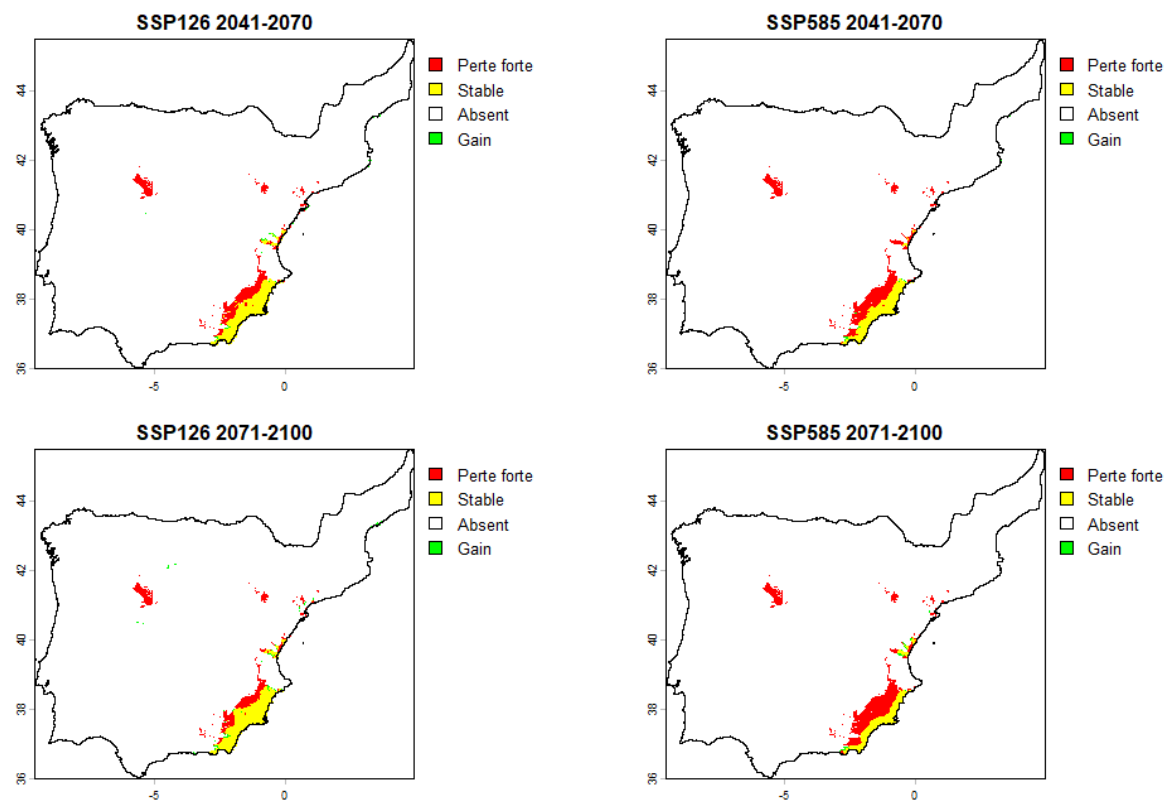
ANNEXE 5 : Modélisation actuelle et projection de la distribution de *P. bocagei* en fonction des différentes périodes et scénarios, binarisé



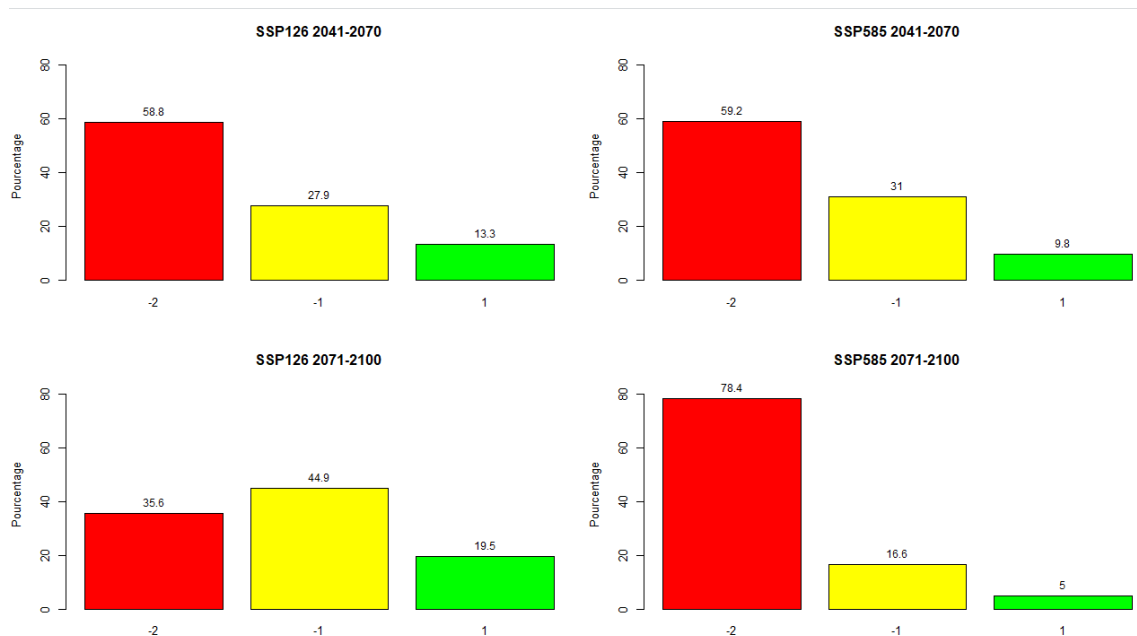
ANNEXE 6 : Modélisation actuelle et projection de la distribution de *P. hispanicus* en fonction des différentes périodes et scénarios, binarisé



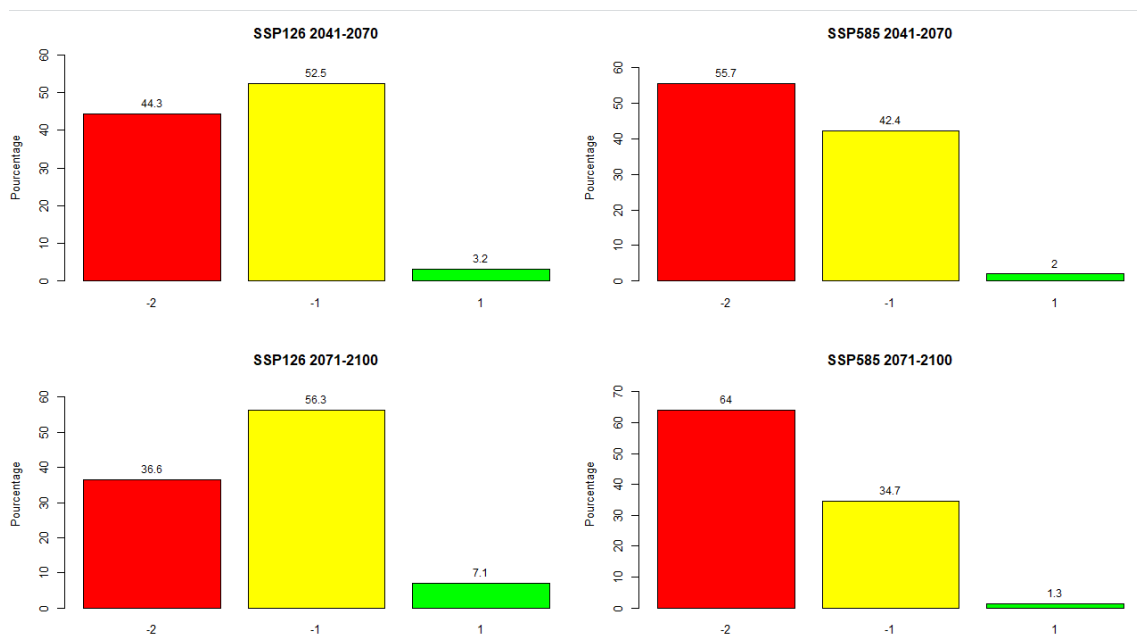
ANNEXE 7 : Modélisation actuelle et projection de la distribution de *P. bocagei* en fonction des différentes périodes et scénarios, binarisé



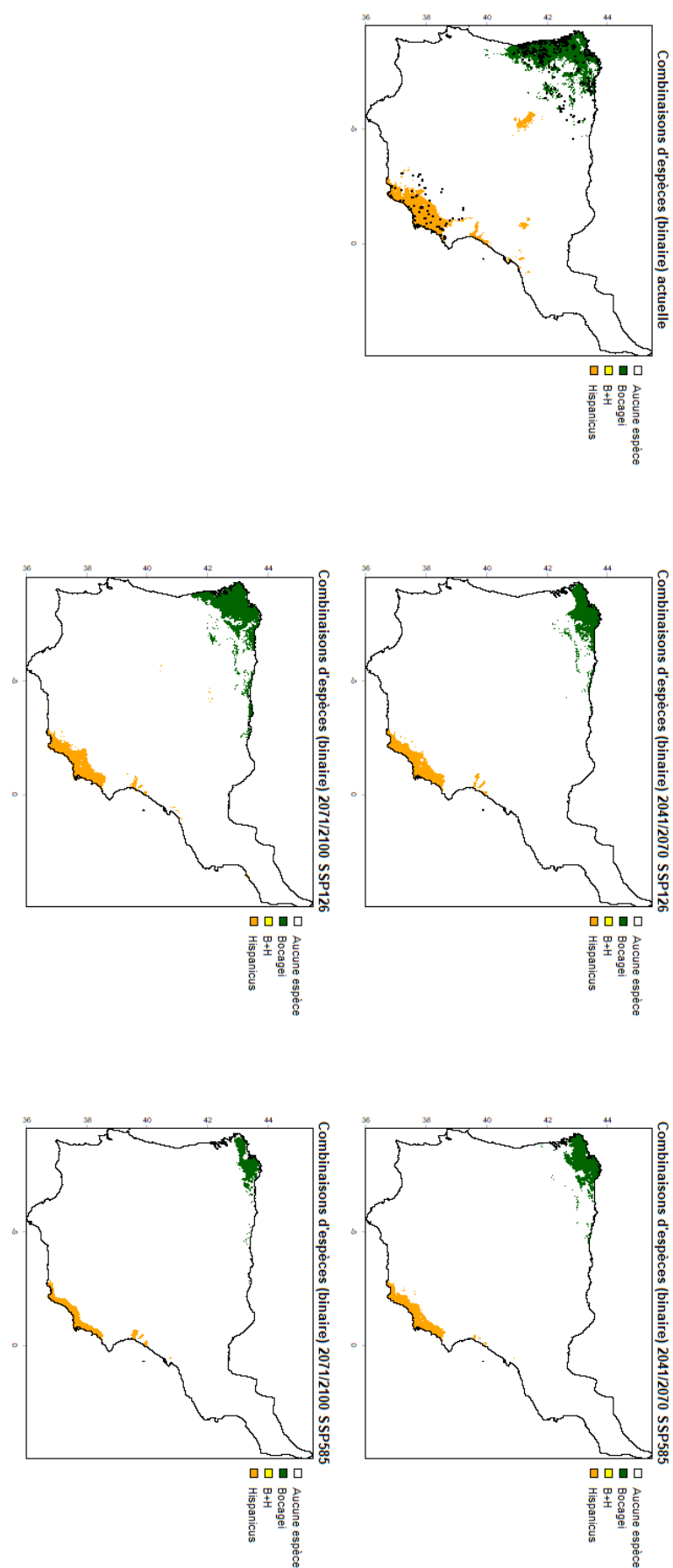
ANNEXE 8 : Modélisation actuelle et projection de la distribution de *P. hispanicus* en fonction des différentes périodes et scénarios, binarisé



ANNEXE 9 : Pourcentage de perte et gain de superficie de la niche écologique de *P. bocagei* en fonction des différentes périodes et scénarios



ANNEXE 10 : Pourcentage de perte et gain de superficie de la niche écologique de *P. hispanicus* en fonction des différentes périodes et scénarios



ANNEXE 11 : Modélisation actuelle et projection de la distribution de *P. hispanicus* et *P. bocagei* en fonction des différentes périodes et scénarios



Directeur.rice de recherche :

Dorian Rumeau

Guillaume Rio
PRI/DAE5
IMATGE / ADAGE
2025-2026

**Modélisation de la réponse au changement climatique du complexe d'espèces
Podarcis iberica : Vulnérabilité climatique de P. Bocagei et P. Hispanicus**

Résumé :

Le réchauffement climatique fait désormais parti du présent et du futur de la planète. Les espèces réagissent différemment aux effets du changement climatique, notamment en redistribuant leurs aires de répartitions. L'objectif de cette étude est de modéliser l'impact du réchauffement climatique sur la distribution des espèces de Podarcis du complexe Podarcis iberica. Actuellement, leurs aires de répartitions sont bien distinctes mais peut être que le réchauffement climatique va modifier cette séparation et créer une concurrence entre ces espèces. Pour cette étude, il a été convenu d'étudier uniquement le P. bocagei et le P. Hispanicus. Dans un premier temps, il a fallu modéliser leur répartition actuelle. Puis, dans un second temps, des projections ont été faites pour visualiser leur répartition en fonction des différents scénarios climatiques et des différentes périodes. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des modèles de distributions d'espèces et de les entraîner avec les variables bioclimatiques adaptées à cette espèce. Il a été convenu d'utiliser un scénario climatique optimiste, le SSP126 et un négatif, le SSP585, afin de visualiser les projections envisageables avec ces deux extrêmes. Une fois que les projections futures ont été réalisées, il a été possible de calculer les diminutions de superficie des niches écologiques de chaque espèce et d'observer si le réchauffement climatique va engendrer une compétition entre ces deux espèces.

Mots Clés : Podarcis, Réchauffement climatique, Modélisation, Modèle de distribution d'espèces,