

2.2.2 Intégration de la variabilité thermique dans des modèles écophysiologiques spatialement explicites d'extinction d'espèces

- Contexte de la modélisation écophysiologique

Auteur : Florèn Hugon

Le réchauffement climatique associé aux activités humaines est responsable de grandes modifications météorologiques ; parmi elles, la hausse des températures, les modifications des débits d'eau et de la couverture neigeuse mais également les augmentations de la variabilité de ces variables climatiques et de la fréquence des événements extrêmes (BUCKLEY & HUEY, 2016). Les espèces présentent trois manières de réagir face au changement climatique. La dispersion – les individus migrent vers des aires d'habitat plus favorables, des phénomènes d'expansion vers le Nord ou en altitude sont souvent observés; l'adaptation – processus qui favorise les individus ayant une meilleure fitness dans le milieu changeant, ce qui conduit à la sélection de gènes qui permettent de vivre dans ce nouvel environnement et l'extinction – ni la dispersion, ni l'adaptation est possible, la population s'éteint (ARAUJO, 2009). Aujourd'hui, le changement est rapide, les populations en danger présentent des effectifs réduits ce qui contraint fortement l'adaptation. De plus, certaines espèces ont de faibles capacités de dispersion ce qui favorise leur probabilité d'extinction (HUEY *et al.*, 2012 ; CAHILL *et al.*, 2012).

Parmi ces espèces quatre espèces (la Grenouille des Pyrénées, le Lézard ocellé, le Lézard de Bonnal et le Lézard catalan, Fig. 14) seront étudiées dans le cadre d'une thèse intitulée « Intégration de la variabilité thermique dans des modèles écophysiologiques spatialement explicites d'extinction d'espèces » (F. Hugon) rattachée au Laboratoire de Mathématiques et leurs Applications de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UMR CNRS 5142) au sein de l'équipe Probabilités et Statistique à laquelle appartiennent les deux directeurs de la thèse, Frank D'AMICO, maître de conférences HDR et Benoit LIQUET, Professeur des universités. L'objectif du travail est de projeter des cartes de répartition pour les quatre espèces présentées, les plus fiables possibles en utilisant une méthodologie originale qui prendra en compte la variabilité des événements climatiques ; notamment les variations de température pour les lézards et de la couverture neigeuse, ainsi que les variations de température de l'eau et d'humidité relative pour la Grenouille des Pyrénées.

Grenouille des Pyrénées, EN
Rana pyrenaica



Torrents de montagnes, cinq populations en France
Espèce endémique

Lézard Ocellé, EN
Timon lepidus



Milieus dunaires ou prairies sèches (Dordogne, Garonne)

Lézard Catalan, NT
Podarcis liolepis



Milieus montagnards, affinité pour les milieux rocheux, chauds et secs

Lézard de Bonnal, EN
Iberolacerta bonnali



Milieus de haute montagne, présent à partir de 1300m
Espèce endémique

Fig. 14. Espèces étudiées

Première méthodologie envisagée et résultat global attendu

Pour répondre à cet objectif global, un modèle mécanistique écophysiological inspiré du modèle de Sinervo et ses collaborateurs sera utilisé (SINERVO *et al.*, 2010). Les modèles mécanistiques permettent d'obtenir des cartes de répartition en explicitant les processus qui définissent les limites des aires de répartition des espèces (KEARNEY & PORTER, 2009 ; EVANS *et al.*, 2015). Ils s'opposent généralement aux modèles corrélatifs qui définissent un lien statistique entre des données de présence-absence ou d'abondance et des variables environnementales (KEARNEY & PORTER, 2009 ; EVANS *et al.*, 2015). Enfin, la combinaison des deux types de modèles aboutit à des modèles hybrides qui permettent souvent de vérifier les projections du modèle corrélatif par l'utilisation du modèle mécanistique (BUCKLEY *et al.*, 2011 ; CEIA-HASSE *et al.*, 2014). Les données écophysiological sont des variables propres à l'espèce et sous dépendance de l'environnement ; par exemple une gamme de température sur laquelle l'individu peut se reproduire. Chez les ectothermes, le temps d'activité, en particulier pendant le printemps est déterminant pour la fitness de l'organisme (SINERVO *et al.*, 2010). Cette réduction du temps d'activité résultant de l'augmentation des températures (Fig. 15), entraîne une réduction de l'énergie acquise en vue de la reproduction qui conduit à une baisse du succès reproducteur et enfin participe à l'augmentation de la probabilité d'extinction de la population.

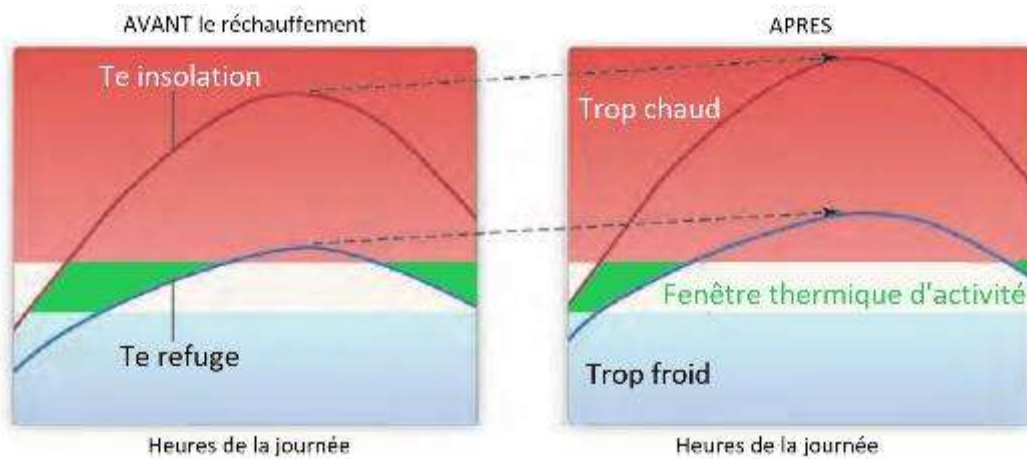


Fig. 15. Fenêtre d'activité thermique en fonction des températures opérantes d'insolation (courbe rouge) et de refuge (courbe bleue).

Avec l'augmentation des températures opérantes, une réduction du temps est observée pendant lequel les températures sont dans la fenêtre thermique d'activité d'où une réduction du temps d'activité avec le réchauffement climatique (Modifié de HUEY *et al.*, 2010).

Ainsi, le modèle mécanistique de Sinervo *et al.* (2010) permet de projeter les extinctions en établissant un lien entre le temps de restriction d'activité, noté H_r – temps pendant lequel l'individu est inactif en refuge et la différence entre la température maximale de l'air, notée T_{max} et la température préférée d'un organisme, notée T_b – température corporelle de l'individu estimée en combinant les températures opérantes d'insolation T_{e_max} et de refuge T_{e_min} . De manière plus concrète, toutes les 10 minutes, échelle de temps à laquelle sont mesurées les températures opérantes, il est défini si cette température permet l'activité des individus en la comparant à T_{pref} – température connue, mesurée empiriquement en établissant un gradient de température dans un bac et en mesurant la température corporelle des individus lorsqu'ils ont choisi leur position dans le bac. Si $T_{e_max} > T_{pref}$ alors il sera indiqué que ce pas de temps correspond à un temps d'inactivité hr . Sur une journée, les hr sont sommés et H_r est obtenu.

Ensuite, H_r et H_{r_limit} – temps de restriction d’activité maximum avant d’engendrer l’extinction – sont comparés. Si $H_r > H_{r_limit}$, l’extinction de la population est définie. Pour faire des projections des extinctions futures, H_r est calculé à partir de la relation $H_r=f(T_{max}, T_b)$ établie par l’étude de populations en particulier, il sera ensuite comparé à H_{r_limit} . Ce modèle a déjà été validé sur un ensemble d’espèce (SINERVO *et al.*, 2010) mais il reste simpliste puisqu’il ne prend pas en compte divers éléments tels que la capacité d’adaptation des espèces (CAMPBELL-STATION *et al.*, 2017 ; SINERVO *et al.*, 2018) ou la structure des microhabitats (SINERVO *et al.*, 2011). Il y a de nombreuses améliorations à proposer dont la compréhension des variabilités temporelles et spatiales des données et de leurs rôles sur les prédictions (KEARNEY *et al.*, 2012 ; FELDMEIER *et al.*, 2018). Également, ce travail de thèse donne l’opportunité d’effectuer la collecte de données sur plusieurs années et donc d’étudier la variabilité inter-année, contrairement à la plupart des autres travaux.

Le modèle de Sinervo utilise un effet seuil pour définir si une population peut être active ou non mais l’activité peut aussi être visualisée en temps continu (GUNDERSON & LEAL, 2015). Par exemple, Gunderson et ses collaborateurs considèrent l’activité comme un processus qui a lieu sur une certaine gamme de température et qui peut varier en intensité. Ils définissent ainsi un cadre conceptuel pour comprendre les contraintes thermiques sur l’activité à l’aide de quatre composantes ; des seuils pour définir la fenêtre d’activité thermique ; le type d’activité ; une distribution de probabilité d’activité selon la température et une vigueur d’activité qui définit l’intensité de l’activité et qui varie également selon la température (GUNDERSON & LEAL, 2016). Selon le type d’activité, les seuils, la distribution de probabilité et la vigueur d’activité sont susceptibles d’être modifiés (Fig. 16). Ce modèle permet ainsi d’être plus précis sur les définitions des temps d’activité et d’inactivité et semblerait plus approprié pour projeter les extinctions liées à cette réduction du temps d’activité. Cependant, les définitions des distributions de probabilité et des vigueurs d’activité nécessitent des données issues de nombreux suivis comportementaux et sont donc difficiles à obtenir. Des travaux précédents ont permis d’obtenir ces courbes pour le têtard de la Grenouille des Pyrénées (CONSTANT, 2017) ; les données recueillies et ces résultats seront dans la mesure du possible ré-exploités dans ce travail de thèse.

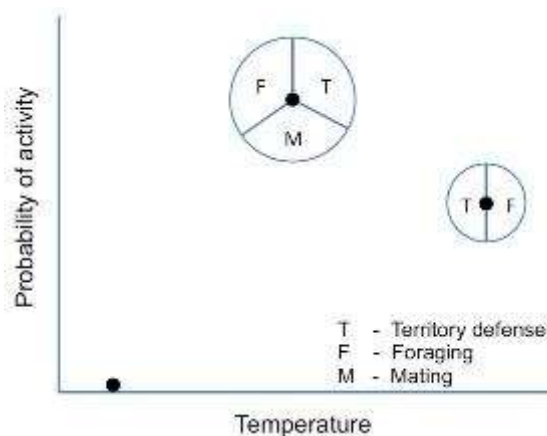


Fig. 16. Cadre conceptuel de la contrainte thermique sur l’activité d’un ectotherme.

Un ectotherme est dans trois conditions thermiques différentes. La probabilité d’activité est indiquée par le point noir, la vigueur d’activité par le diamètre du cercle et le type d’activité par les lettres (GUNDERSON & LEAL, 2016).

En parallèle du développement d'un modèle mécanistique comme discuté précédemment, une approche corrélative de la répartition de ces quatre espèces sera effectuée. Les données de comptage ou de présence-absence (ou données de détection/non-détection) (cf. § 4.2, §8.5, § 8.6) seront explorées sous R et QGIS, un logiciel de SIG. Pour exploiter au mieux ces données, un modèle N-mélange qui intégrera les deux types de données sera utilisé afin de déterminer la probabilité de détection sur chaque site et d'estimer l'abondance réelle de la population (ZIPKIN *et al.*, 2017); ces estimations seront ensuite intégrées dans un modèle corrélatif. Puis, les séries temporelles des températures de l'air mesurées par les stations météorologiques et éventuellement d'autres variables climatiques explicatives parmi les indicateurs climatologiques définis par l'Organisation Mondiale de la Météorologie seront analysées. Ensuite, un modèle corrélatif de répartition des espèces comme MaxEnt, BIOMOD ou sdm – une des dernières plateformes publiées sous R (NAIMI & ARAUJO, 2016) – sera utilisé pour modéliser la répartition actuelle et future. Enfin, les résultats des deux méthodes seront confrontés. A l'aide des deux approches mises en œuvre, une projection de la carte de répartition des quatre espèces d'étude – Grenouille des Pyrénées, Lézard de Bonnal, Lézard catalan et Lézard ocellé – sera réalisée comme ont pu le faire Ceia-Hasse et ses collaborateurs (CEIA-HASSE *et al.*, 2014) (Fig. 17).

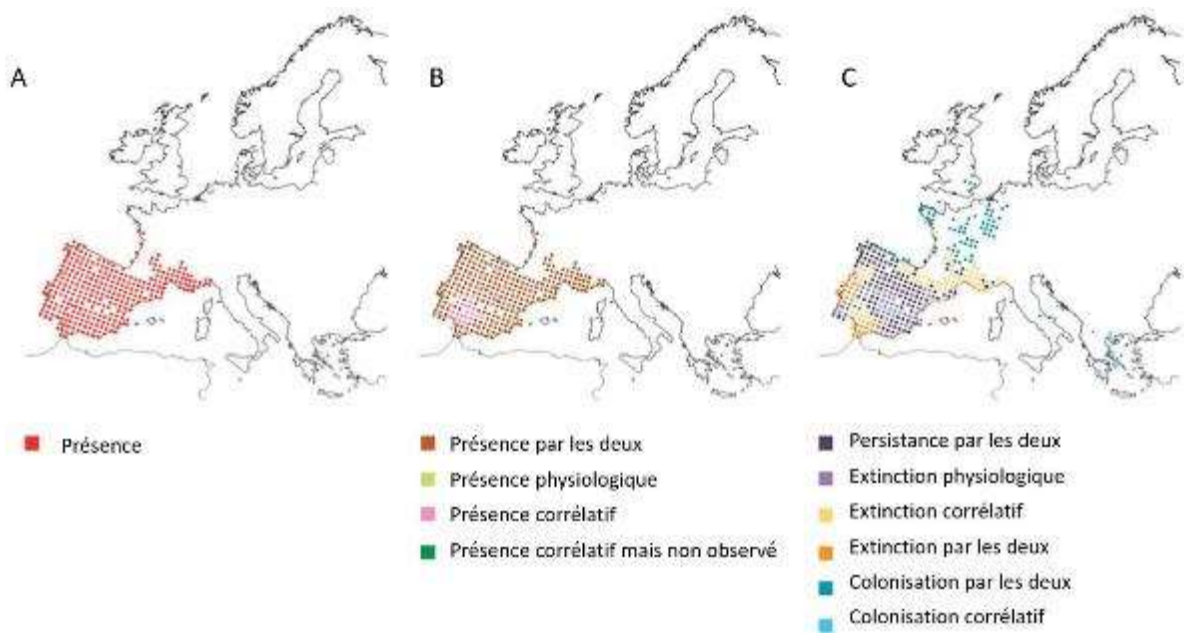


Fig. 17. Carte de répartition pour *Timon lepidus*. Répartition observée (A), répartition prédite (B) et répartition projetée (C) pour les deux méthodologies, corrélative et mécanistique (CEIA-HASSE *et al.*, 2014).