

- Niche thermique des lézards : Lézard de Bonnal (*Iberolacerta bonnali*) et Lézard catalan (*Podarcis liolepis*)

Auteur : Frank D'Amico

Étant ectothermes, les Lézards constituent un excellent modèle pour l'incorporation de telles contraintes explicitement lors de la modélisation des changements en réponse au changement climatique, parce que leur physiologie et leur répartition sont plus directement influencées par la température ambiante.

L'UPPA assure les études de terrain qui permettent d'acquérir les données utiles en vue de la modélisation de l'extinction et de la répartition future sous différents scénarii climatiques de deux Lézards de montagne: le Lézard de Bonnal et le Lézard catalan. Il s'agit de mesurer directement les variations des températures opérantes en déployant des modèles biomimétiques. L'approche utilise les différences entre température préférée (T_{pref}), températures opérantes (T_e) et température maximale de l'air (T_{max}) pendant les saisons de reproduction comme prédicteurs du risque d'extinction, en s'inspirant des modèles d'extinction de SINERVO *et al.* (2010).

Trois espèces de lézards sont prises en compte dans le volet qui incombe à l'UPPA : deux espèces de lézards de montagne et une espèce de lézard présent sur le littoral de la région Nouvelle-Aquitaine.

Les espèces de lézards d'altitude, endémiques des Pyrénées du genre *Iberolacerta*, semblent particulièrement menacées par le changement climatique (ARAUJO *et al.*, 2006a). Le Lézard de Bonnal *Iberolacerta bonnali* vit principalement entre 1800 m et 2200 m d'altitude. La principale menace qui semble peser sur cette espèce est l'élévation des températures. À terme, celle-ci permettrait la remontée d'espèces compétitrices (par exemple le Lézard des murailles *Podarcis muralis*) et prédatrices (par exemple la Coronelle lisse *Coronella austriaca*) entraînant à terme la disparition des espèces d'iberolézards (POTTIER *et al.*, 2014).

Abondant en Espagne, le Lézard catalan *Podarcis liolepis*, une espèce d'affinité ibérique, est localisé dans le sud-ouest de la France sur quelques affleurements rocheux du Pays basque et de la vallée d'Aspe. Malgré la présence d'habitats favorables à des altitudes supérieures, ce lézard n'est aujourd'hui localisé qu'en dessous de 900 m dans les Pyrénées-Atlantiques (BERRONEAU *et al.*, 2012). Sa répartition altitudinale pourrait évoluer à moyen terme. Contrairement au Lézard de Bonnal, l'hypothèse première est ici une extension de l'aire de répartition du Lézard catalan.

Le lézard ocellé, *Timon lepidus*, est une espèce intéressante à étudier car sa réponse au changement climatique varie localement : contraction ou extension de l'aire sont toutes deux possibles (CEIA-HASSE *et al.*, 2014). Qui plus est, la caractérisation de la réponse chez cette espèce est sensible à la technique de modélisation corrélative choisie et dépend aussi des scénarios climatiques envisagés (ARAUJO *et al.*, 2006a ; CEIA-HASSE *et al.*, 2014).

– Matériel et méthodes

Les modèles d'extinction utilisés (SINERVO *et al.*, 2010 ; CEIA-HASSE *et al.*, 2014 ; GUNDERSON & LEAL, 2016) permettent, avec effet de seuil ou de façon probabiliste continue, de lier les données de température opérante T_e (définie ci-dessous) aux valeurs locales de température et par conséquent, reconstruire les environnements et la physiologie rencontrées par les populations quand elles se sont éteintes, et potentiellement reconstruire les environnements futurs à être ressentis par les individus de ces populations soumises au réchauffement climatique. Les valeurs de T_e obtenues estiment le nombre d'heures pendant lesquelles les adultes peuvent être actifs (c'est à dire, $T_e \leq T_p$), avant d'avoir à se soustraire de la chaleur et de se retirer dans des refuges thermiques. Le risque d'extinction est élevé quand de hautes valeurs de T_e restreignent le temps d'activité dédié à la recherche alimentaire pendant les périodes de reproduction, au-delà des limites critiques, ces heures de restriction étant notées « h_r » (cf. SINERVO *et al.* (2010)).

La température opérante (T_e) est définie comme étant la température du corps d'un animal s'il était en équilibre thermique avec le milieu, en l'absence d'élévation de température métabolique ou de refroidissement par évaporation. Elle est mesurée avec des modèles physiques disposés dans l'environnement ou avec des équations mathématiques décrivant le transfert de chaleur en condition d'équilibre, entre l'animal et l'environnement (DZIALOWSKI, 2005). Dans le cadre de cette étude, des modèles biophysiques (appelés aussi biomimétiques) sont choisis. La mesure des températures opérantes implique de déploiement sur le terrain, pendant la période de reproduction des espèces étudiées, de modèles biomimétiques. Ces modèles biomimétiques enregistrent les températures opérantes (T_e) de lézards en situation d'insolation et en situation de retraite au gîte. Le modèle est fait d'une sonde enregistreuse HOBO Onset de type U23-003 Ext T / Ext T munie de deux capteurs extérieurs : ce type de spécification technique offert par ce matériel HOBO Onset permet d'équiper chaque capteur extérieur de tubes en PVC pour constituer les modèles biophysiques utilisés pour enregistrer les températures opérantes du Lézard (Fig. 24). Un modèle biomimétique type est illustré à la Fig. 24. Sur le terrain, chaque modèle est déployé d'une façon très précise de façon à ce qu'un tube reste en surface pour modéliser la température opérante d'un lézard en insolation tandis qu'un tube est enfoui à 15–20 cm de profondeur (sous les pierres) pour modéliser la température opérante d'un lézard à l'abri du soleil comme l'illustre la Fig. 25. Basée sur l'utilisation de modèles biophysiques, biomimétiques, l'approche expérimentale utilisée présente l'avantage supplémentaire qu'elle n'implique pas de capture d'individus vivants, ce qui est important bien évidemment quand l'étude porte sur des populations locales d'une espèce vulnérable, à plus forte raison quand elle est endémique de surcroît.



Fig. 24. Illustration d'un modèle biomimétique de lézard fait d'une sonde enregistreuse HOB0 Onset de type U23-003 Ext T / Ext T et de ses deux capteurs insérés dans les tubes en PVC qui imiteront sur le terrain les lézards en situation d'insolation et en situation de retraite au gîte (© F. D'Amico).

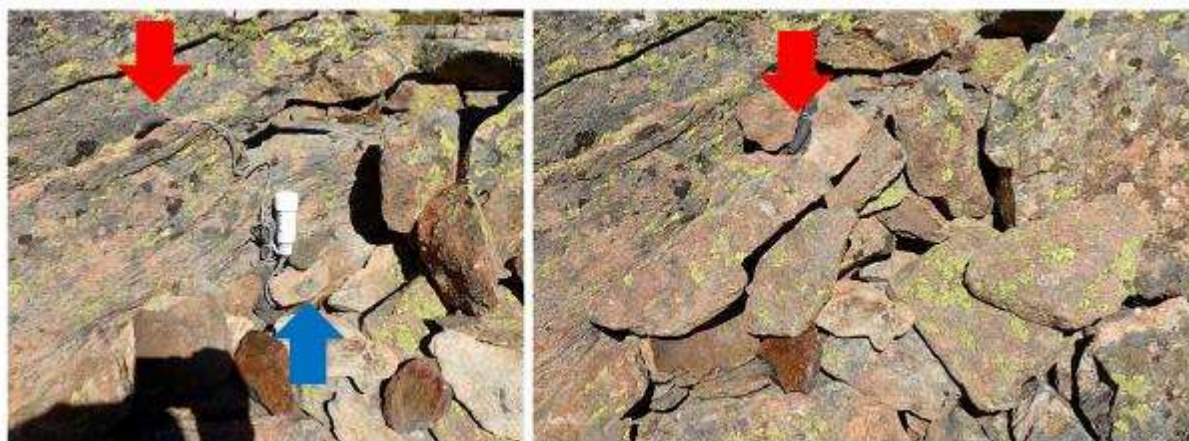


Fig. 25. Déploiement d'un modèle biomimétique de Lézard de bonnal sur le site de Peryreget (© F. D'Amico).

A gauche, installation de la sonde et des tubes en PVC : la flèche rouge indique le tube qui restera en surface pour modéliser la température opérante d'un lézard en insolation ; la flèche bleue indique le tube enfoui sous les pierres pour modéliser la température opérante d'un lézard à l'abri du soleil. A droite, le modèle installé : seul apparaît encore, de façon très discrète, le tube biomimétique du lézard en situation d'insolation.

Pour le **Lézard de Bonnal**, en 2017 comme en 2018, deux sites d'études ont été choisis, en limite ouest de répartition de l'espèce, en vallée d'Ossau:

– site d'Anglas (commune d'Eaux-Bonnes): La population locale de ce site à proximité du lac d'Anglas (2030 m) correspond, de façon relative, à une population de « basse » altitude (cf. section §8.6 du présent rapport). Deux modèles thermiques biomimétiques ont été installés durant la saison de reproduction de l'espèce dans un pierrier; ils sont accompagnés d'un enregistreur Hobo Onset U23-002 RH / Ext T qui enregistre température et humidité relative dans le pierrier.

– site de Peyreget (commune de Laruns): La population locale de ce site de part et d'autre du Pic Peyreget (2480 m) correspond, de façon relative, à une population de « haute » altitude (cf. section §8.6 du présent rapport). Quatre modèles thermiques biomimétiques ont été installés durant la saison de reproduction de l'espèce dans quatre pierriers le long d'un gradient altitudinal et en tenant compte

de l'effet de versant (exposition Sud vs Nord): il s'agit d'un design factoriel 2 x 2 (altitude x exposition). Ces quatre modèles biomimétiques sont accompagnés de deux enregistreurs Hobo qui enregistrent température et humidité relative dans les pierriers en versant Sud et en versant Nord. En tout, deux types de sondes ont été déployées: Onset HOB0 U23-003 Ext T / Ext T et Onset HOB0 U23-002 RH / Ext T. Le type U23-002 RH / Ext T est utilisé sans modification pour l'enregistrement de la température de l'air, à l'abri et au niveau du sol, et de l'humidité relative. Le site de Peyreget étant inscrit en zone cœur du Parc National des Pyrénées, une autorisation d'installation a été obtenue du service scientifique du Parc National des Pyrénées (réf. n° 2017-228 et n° 2018-99). Un compte rendu détaillé des suivis est fourni annuellement au Parc National des Pyrénées (D'Amico F. 2018- Compte -rendu d'activités en rapport avec l'autorisation n° 2017-228. 8 pages; D'Amico F. 2019- Compte -rendu d'activités en rapport avec l'autorisation n° 2018-99. 8 pages). En 2017, six modèles ont été installées de façon temporaire sur le site du Pic de Peyreget (massif de l'Ossau), entre le 14 juillet et le 23 octobre 2017. A l'issue de cette période, les modèles ont été retirés et les données déchargées pour intégration ultérieure dans des modèles écophysiologiques d'extinction. Les six sondes au total ont été déployées, à deux altitudes différentes, et à deux expositions (Fig. 26), de part et d'autre du Pic Peyreget, conformément aux informations données à la Fig. 26. L'installation de ce matériel a été réalisée de façon discrète et non intrusive, en dehors des sentiers fréquentés par les visiteurs du PNP. En 2018, six sondes ont été installées à nouveau de façon temporaire sur le site du Pic de Peyreget (massif de l'Ossau), entre le 12 juillet et le 23 octobre 2018; il s'agit des mêmes sondes, à l'exception de la sonde 20029881 dont les deux fils connecteurs aux tubes PVC ont été retrouvés sectionnés (par un carnivore ?) à plusieurs endroits (voir plus loin la Fig. 31) et qui a cessé de fonctionner le 3/9/2017 ; devenue inopérante en 2017, cette sonde est remplacée par la sonde 200153119 en 2018.

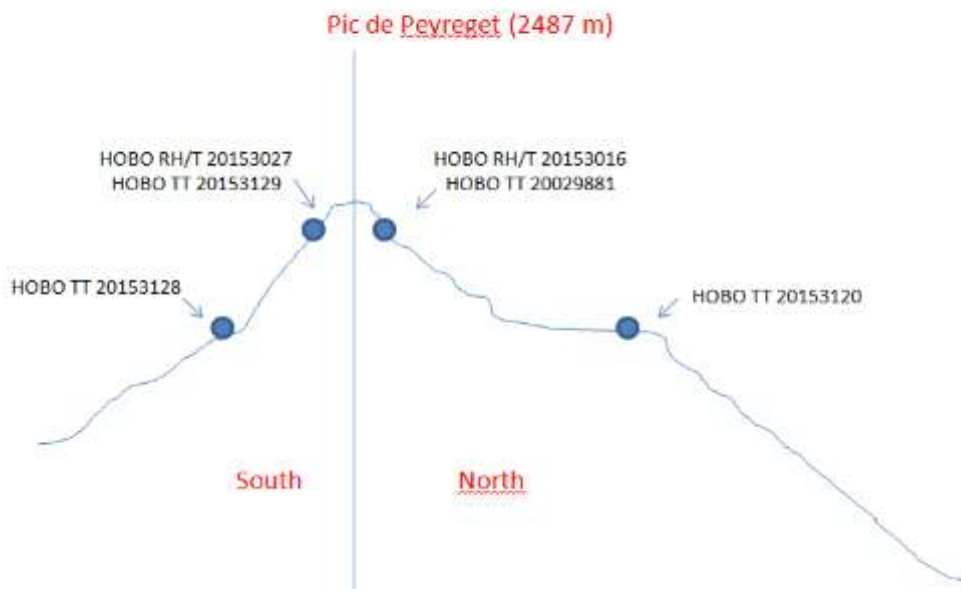


Fig. 26. Profil altitudinal simplifié et localisation des modèles biomimétiques (sondes Onset HOB0) installés sur le Pic de Peyreget.

Pour **le Lézard catalan**, en 2017 comme en 2018, deux sites d'études ont été choisis, au Pays basque et en vallée d'Aspe, en limite Est de répartition de l'espèce.

– site de Mendive (Pays basque): La population locale de ce site correspond, de façon relative, à une population de « haute » altitude (cf. section §8.6 du présent rapport). Deux modèles thermiques biomimétiques ont été installés durant la saison de reproduction de l'espèce dans un pierrier fréquenté par l'espèce à 740 m, et deux autres dans un pierrier à plus haute altitude (1030 m) non encore fréquenté par l'espèce; au démarrage de l'étude, le Lézard catalan a pour limite altitudinale supérieure connue 900 m (BERRONEAU *et al.*, 2012). L'intérêt du suivi des températures opérantes sur ce site est double: i/ dans une vision statique, il s'agit de comparer celles-ci en deçà (< 900 m) et au-delà (> 900 m) de la limite altitudinale connue pour l'espèce au démarrage du programme les sentinelles du climat (cf. section §8.6 du présent rapport); ii/ dans une approche dynamique, avec le changement attendu de la répartition de l'espèce au fil des années, l'information accumulée permettra de comprendre l'évolution des températures qui auront rendu possible cette remontée en altitude. En 2017, quatre sondes ont été installées de façon temporaire sur le site du Pic de Behorleguy (commune de Mendive) entre le 01 juin et le 17 octobre 2017. A l'issue de cette période, les sondes ont été retirées et les données déchargées pour intégration ultérieure dans des modèles écophysiologiques d'extinction. Ces sondes de type U23-003 Ext T / Ext T sont équipés de deux tubes en PVC pour constituer les modèles biophysiques utilisés pour enregistrer les températures opérantes du Lézard catalan (un tube installé en surface pour modéliser la température opérante d'un lézard en insolation; un tube enfoui à 10 cm de profondeur pour modéliser la température opérante d'un lézard à l'abri du soleil – idem Fig. 25). Les 4 sondes au total ont été déployées, à deux altitudes différentes, sur le versant exposé au sud-ouest du Pic de Behorleguy, conformément aux informations données à la Fig. 27. L'installation de ce matériel a été réalisée de façon discrète et non intrusive, en dehors des sentiers fréquentés par les randonneurs, et sur les sites réellement utilisés par les lézards (cf. Fig. 28). En 2018, ces quatre même sondes ont été ré-installées de façon temporaire sur le même site pour enregistrer les températures opérantes entre le 17 avril et le 15 septembre 2018.

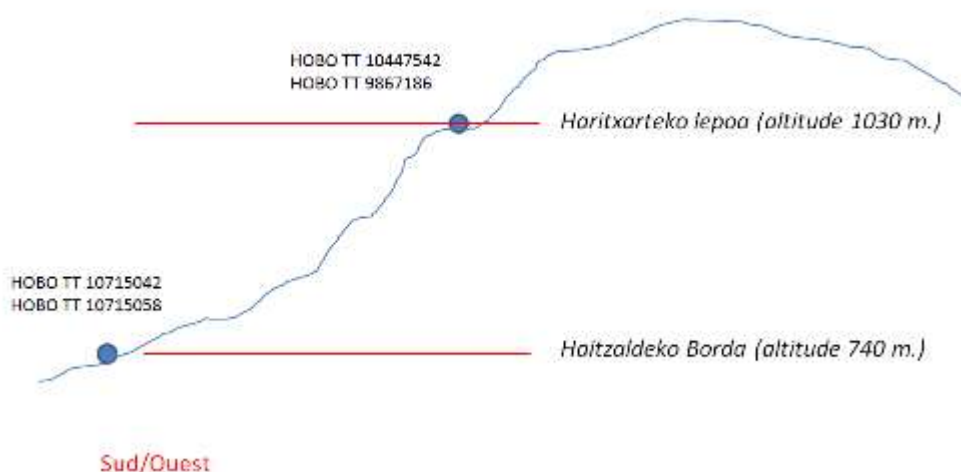


Fig. 27. Profil altitudinal simplifié et localisation des modèles biomimétiques (sondes Onset HOBO) installés sur le Pic de Behorleguy.



Fig. 28. Femelle de Lézard catalan en position de « chauffe » dans son habitat naturel avec au premier plan un des modèles biomimétiques installé au dessus de Mendive, sur le site d'Haitzaldeko borda à 740 m d'altitude (© M. Berroneau).

– site du chemin de la Mâtüre (vallée d'Aspe): La population locale de ce site correspond à une population isolée (cf. section §8.6 du présent rapport). En 2017, trois sondes ont été installées de façon temporaire sur le site du chemin de la Mâtüre (commune d'Etsaut en vallée d'Aspe) et ont fonctionné entre le 23 mai et le 24 octobre 2017. A l'issue de cette période, les sondes ont été retirées et les données déchargées pour intégration ultérieure dans des modèles écophysiologiques d'extinction. Ces sondes de type U23-003 Ext T / Ext T sont équipés de deux tubes en PVC pour constituer les modèles biophysiques utilisés pour enregistrer les températures opérantes du Lézard catalan (un tube installé en surface pour modéliser la température opérante d'un lézard en insolation; un tube enfoui à 10 cm de profondeur pour modéliser la température opérante d'un lézard à l'abri du soleil). Les 3 sondes ont été déployées, à sensiblement la même altitude, mais à des expositions différentes: Est, Sud et Ouest pour tenir compte de la conformation particulière du chemin conformément aux recommandations formulées par M. Berroneau. L'installation de ce matériel a été réalisée de façon discrète et non intrusive, le long de l'unique sentier très fréquenté par les randonneurs et grimpeurs. En 2018, ces trois sondes ont été ré-installées de façon temporaire sur le même site, entre le 17 avril et le 15 septembre 2018.

Pour le Lézard ocellé, en 2018, quatre sites d'études ont été choisis, le long d'un gradient nord-sud le long du littoral néo-aquitain:

1. site Vendays (33)

2. site Carcans (33)

3. site de Contis (40): ce site est soumis à l'influence de l'embouchure du courant de Contis, où la dynamique hydro-sédimentaire est complexe et influe sur la morphologie du littoral. Le modèle biomimétique est placé à proximité de la station météo au niveau de l'ourlet forestier.

4. site de Tarnos (64) : A l'extrémité sud-ouest de l'aire de répartition française de ce Lézard Tarnos, le site choisi est dans l'exclos expérimental du site Natura 2000 FR7200713 - Dunes modernes du littoral landais de Capbreton à Tarnos. Sur les conseils d'Arnaud Bassibey (Office National des Forêts), dont l'appui pendant le lancement des suivis de terrain a été précieux, le modèle biomimétique est placé sur le substrat, dans une zone dégagée (Fig. 29).



Fig. 29. Modèle biomimétique de Lézard ocellé installé sur le terrain (© F. D'Amico).

Seul apparaît le tube biomimétique du lézard en situation d'insolation (flèche rouge) ; la flèche bleue clair indique le tube enfoui dans le sable sous les pierres pour modéliser la température opérante d'un lézard à l'abri du soleil.

Pour le Lézard ocellé, à titre exploratoire, un 2ème volet de recherche a été développé. Il porte sur l'évaluation rapide de la niche thermique *in situ* par mesure pyrométrique infra-rouge à distance.

Les Lézards (comme la plupart des ectothermes) peuvent atteindre leur température corporelle préférée (notée T_{pref}) en sélectionnant dans leur environnement thermique immédiat certains micro-habitats pour leurs caractéristiques thermiques. On ne sait pas dans quelle mesure la complexité structurelle de l'habitat fournit des microhabitats thermiques pour la thermorégulation (e.g. (GOLLER *et al.*, 2014) mais ce genre d'informations permet de caractériser certaines variables de la niche thermique de l'espèce étudiée. L'idée est de mesurer conjointement la structure thermique des microhabitats disponibles dans l'environnement (descripteur de l'hétérogénéité de la niche thermique disponible en théorie) et la température du substrat sélectionné préférentiellement par les individus (descripteur de la niche thermique spécifique - niche réalisée) en même temps que la température du lézard sur ce microhabitat préférentiel. Différentes approches statistiques seront utilisées pour caractériser la niche thermique théorique et la niche thermique réalisée, sur la base de comparaison de données mesurées rapidement au moyen d'un thermomètre IR à distance. Le principe opérationnel est de procéder à des mesures rapides pour ne pas alourdir les relevés d'abondance (comptages) prévus dans le protocole initial. L'objectif n'est pas une mesure précise et absolue des niches, et encore moins une estimation précise de la température corporelle des individus, mais plutôt une évaluation relative rapide des différences relatives.

Quelques études ont évalué la corrélation entre mesure de température corporelle par contact direct (mesure cloacale, fiable mais contraignante et invasive) et la mesure indirecte par thermographie ou pyrométrie infrarouge (IR) : selon la partie du corps, les corrélations entre ces mesures sont plus ou moins bonnes, les meilleures correspondances étant observées pour l'œil puis la base de la queue (e.g. (BARROSO *et al.*, 2016). L'idéal serait de procéder à une calibration préalable mais comme on ne cherche pas à mesurer la température absolue des Lézards, mais plutôt un écart relatif entre leur température corporelle et la température environnante, la mesure pyrométrique IR à distance peut être utilisée.

Concrètement, la caractérisation de la niche thermique se fait par une évaluation rapide et simplifiée, directement sur le terrain, de la température corporelle des Lézards en insolation et de la température du micro-habitat sélectionné dans l'environnement disponible. Le modèle de thermomètre portable à visée laser utilisé (modèle 64max FLUKE multifonction IR thermometer 20 :1 D :S) permet une mesure simple et fiable à distance.

Le protocole opératoire de mesures sur le terrain consiste, chaque fois qu'un lézard est contacté et qu'il peut être approché à moins de 10 mètres (idéalement 5 m), à prendre les 3 types de mesures suivantes :

- 1- lézard : 5 mesures à différents endroits du corps (en évitant de pointer le laser dans l'œil de individu)
- 2- niche thermique réalisée : environnement immédiat du lézard (surface circulaire de 1 m de diamètre) : 5 mesures distinctes, à raison d'une mesure directe du substrat sur cinq points régulièrement espacés d'un cercle approximatif de 50 cm de rayon autour du lézard (les mesures doivent être rapides, « sans réfléchir »). Indiquer le substrat : sable, herbe, etc.
- 3- niche thermique théorique: environnement éloigné du lézard (à plus de 10 mètres du lézard) : 10 mesures directes du substrat sur des points régulièrement espacés (les mesures doivent être rapides, « sans réfléchir »). Indiquer les substrats présents : sable, herbe, etc.

Concrètement, il s'agit de visualiser approximativement un cercle de 5 m de rayon autour du lézard (circonférence = 31,4 m), et faire une mesure tous les 3 mètres environ. Si le lézard s'est déplacé, l'idéal est de pouvoir faire les mesures en se plaçant à l'emplacement précis occupé par le lézard. Si ce n'est pas le cas (lézard reste immobile) et si la distance est trop grande (> 10 m) entre l'observateur et le lézard, mesurer seulement les 5 points du cercle les plus proches.

– Résultats exploratoires

Des exemples de résultats fournis par les modèles biomimétiques sont donnés aux Fig. 30–Fig. 31. Chaque modèle biomimétique est fait d'une sonde enregistreuse HOBO connectée à deux enregistreurs indépendants extérieures, chacun équipé d'un tube en PVC dont le volume et la taille sont calibrés pour imiter le corps de l'espèce de lézard étudié, et qu'un tube est installé en surface pour modéliser la température opérante d'un lézard en insolation tandis que l'autre est enfoui à 10 cm de profondeur pour modéliser la température opérante d'un lézard à l'abri du soleil. Chaque modèle biomimétique fournit donc deux tracés : un qui correspond aux variations de température opérante du lézard en insolation (trait pointillé sur la Fig. 30) et un qui décrit les variations de température opérante du lézard dans son gîte, à l'abri du soleil (trait continu sur la Fig. 30). Rappel important, les températures opérantes (T_e) mesurées ne correspondent en aucun cas aux températures de l'environnement immédiat dans l'air et ne doivent être ni confondues, ni interprétées comme telles.

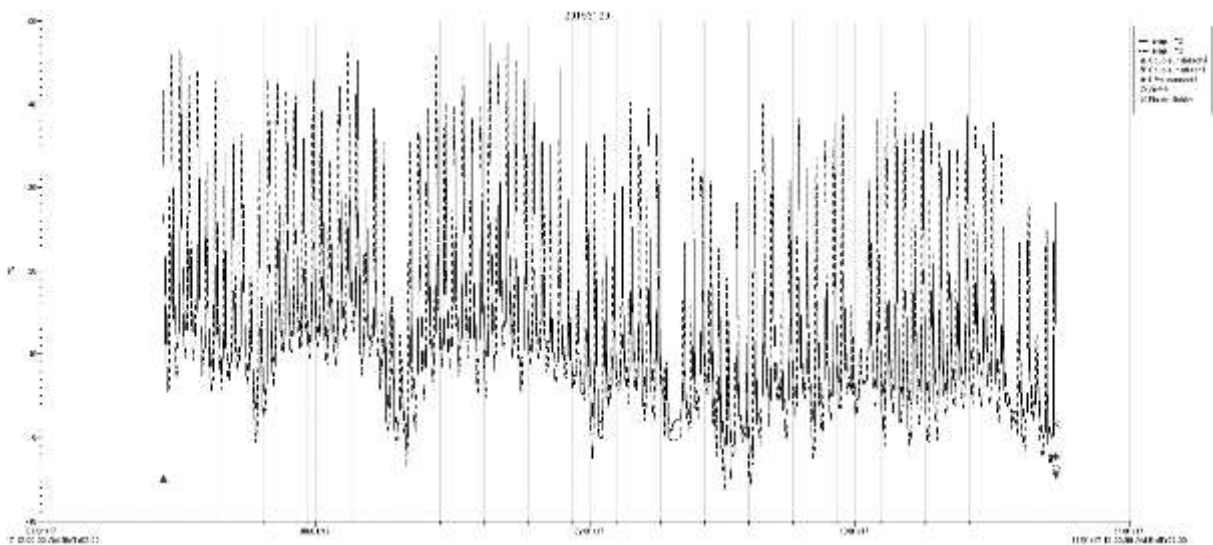


Fig. 30. Exemple de résultat issu des modèles biophysiques pour le Lézard de Bonnal – Tracés correspondant aux enregistrements de température opérative (T_e) de la sonde n° 20153129 HOBO Onset Ext T / Ext T entre le 14/07/2017 18h00 et le 23/10/2017 12h08, à 2440 mètres d'altitude.

Le trait pointillé correspond aux variations de température opérante du lézard en insolation ; le trait continu décrit les variations de température opérante du lézard dans son gîte, à l'abri du soleil. [Logiciel: Hoboware Pro™ – En abscisse, le temps; en ordonnée, la température en °C].

Pour le **Lézard de Bonnal**, en 2017 comme en 2018, tous les modèles biophysiques ont fonctionné de façon optimale, à l'exception de celui de la sonde 20029881 dont les deux fils connecteurs aux tubes PVC ont été retrouvés sectionnés (par un carnaissier ?) à plusieurs endroits et qui a cessé de fonctionner le 3/9/2017 entre 2h et 2h10 du matin (Fig. 31). Pour éviter que ce type de dégradation ne se reproduise,

une protection simple au moyen d'un grillage a été testée en 2018; aucune dégradation n'a été constatée à l'issue de la campagne, indiquant une bonne efficacité de ce dispositif.

Pour le **Lézard catalan**, en 2017 comme en 2018, tous les modèles biophysiques ont fonctionné de façon optimale, à l'exception de celui de la sonde 10715059 qui a connu un défaut d'enregistrement en 2018 et qui avait été manifestement vue et déplacée par un promeneur en 2017.

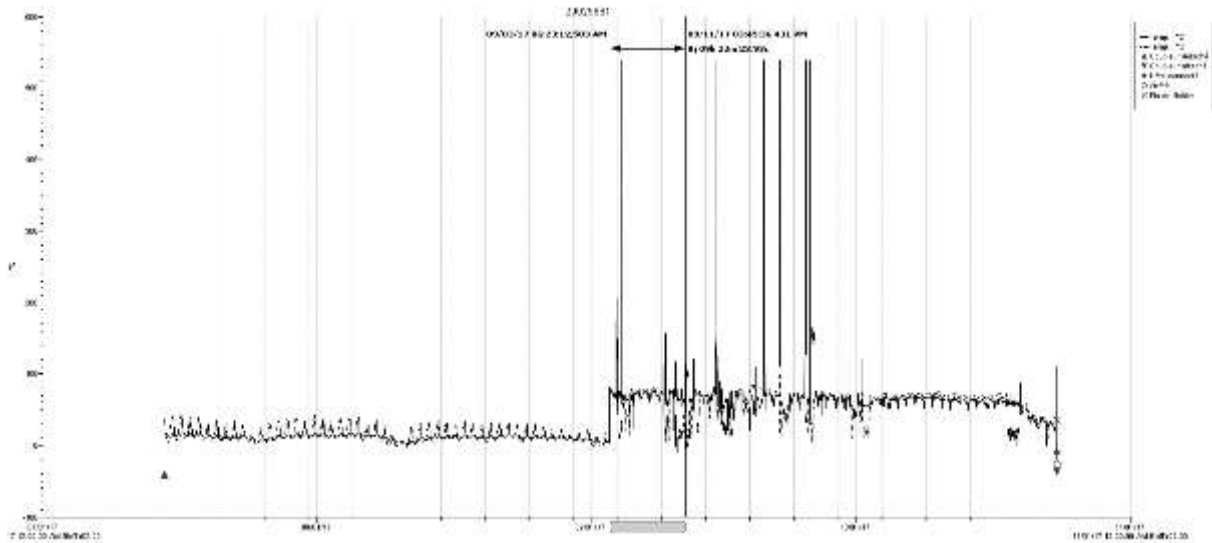


Fig. 31. Tracé correspondant aux enregistrements de température opérative (Te) de Lézard de Bonnal de la sonde n° 20029881 HOBO Onset Ext T / Ext T entre le 14/07/2017 18h00 et le 23/10/2017 12h08, à 2440 mètres d'altitude.

Les conséquences de la dégradation du matériel le 3 sept 2017 sont bien visibles [Logiciel: Hoboware Pro™ – En abscisse, le temps; en ordonnée, la température en °C].

En 2018, pour toutes les espèces, tous les modèles biophysiques ont fonctionné de façon optimale (exemple Fig. 32).

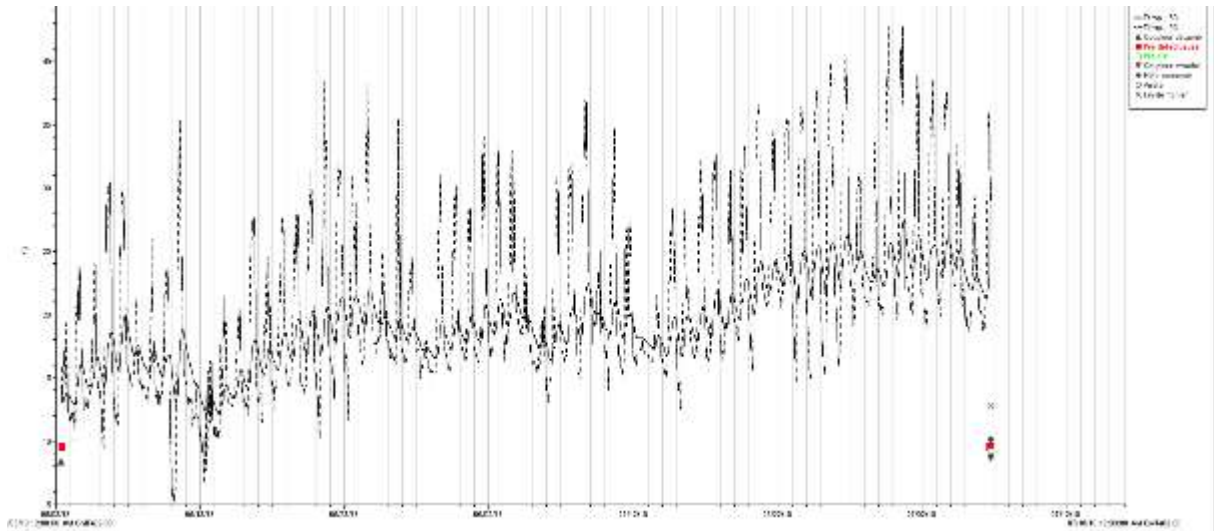


Fig. 32. Exemple de résultat issu des modèles biophysiques de Lézard ocellé sur le site de Tarnos – Tracés correspondant aux enregistrements de température opérative (T_e) de la sonde n° 10324826 HOBO Onset Ext T / Ext T avec un focus temporel entre le 03/05/2018 et le 06/06/2018.

Le trait pointillé correspond aux variations de température opérante du lézard en insolation ; le trait continu décrit les variations de température opérante du lézard dans son gîte, à l'abri du soleil. [Logiciel: Hoboware ProTM – En abscisse, le temps; en ordonnée, la température en °C].

– Discussion

Les analyses des données de température opérantes collectées en 2017 et 2018 seront réalisées dans le cadre de la Thèse de Doctorat de Florèn Hugon (cf § Contexte de la modélisation écophysiological), recrutée dans le cadre du programme les sentinelles du climat au 1^{er} octobre 2018. Ces données originales de T_e devront être couplées à d'autres données physiologiques, notamment des données sur la température corporelle réelle (T_b) des lézards) et des données sur la température préférée (T_{pref}) qui sont obtenues dans des conditions de laboratoire. La plupart de ces données physiologiques ont déjà été acquises dans le cadre de collaborations antérieures (notamment lors du programme « NSF–Collaborative Research: Quantifying Climate–forced Extinction Risks » porté par Barry Sinervo (PI ; Université de Californie) et Donald Miles (CoPI ; Université de l'Ohio) et lors des visites de Barry Sinervo à l'UPPA en 2015 et en 2018 sur ressources internes UPPA en 2015 et avec le soutien de l'INSMI en 2018) ou seront tirées de la littérature scientifique. L'ensemble sera intégré dans des modèles d'extinction qui permettent de lier les données de température opérante T_e aux valeurs locales de température et par conséquent, reconstruire les environnements et la physiologie rencontrées par les populations au moment de l'extinction, et potentiellement reconstruire les environnements futurs à être ressentis par les individus de ces populations soumises au réchauffement climatique. Sinervo et ses collègues (SINERVO *et al.*, 2010 ; CEIA–HASSE *et al.*, 2014) ont amélioré les modèles physiologiques de risque d'extinction chez une espèce mexicaine en conduisant une étude de régression entre la différence de température $T_{max} - T_p$ et les températures environnementales (DZIALOWSKI, 2005) (T_e) sur les sites où l'espèce est éteinte et sur les sites où elle se maintient. Au plan technique, les valeurs de T_e obtenues estiment le nombre d'heures pendant lesquelles les adultes peuvent être actifs (c'est à dire, $T_e \leq T_p$), avant d'avoir à se soustraire de la chaleur et de se retirer dans des refuges thermiques. Le risque d'extinction est élevé quand de hautes valeurs de T_e restreignent le temps d'activité dédié à la recherche alimentaire pendant les périodes de

reproduction, au-delà des limites critiques, ces heures de restriction étant notées « hr » (cf. SINERVO *et al.* (2010) ; CEIA-HASSE *et al.* (2014)). Les prédictions sont que les Te doivent être déjà plus élevées sur les sites où les populations locales ont déjà disparu ou sont en passe de disparaître, tels que ceux trouvés sur les sites de basse altitude en Nouvelle-Aquitaine où *Zootoca vivipara* est déjà enregistré comme éteinte (SINERVO *et al.*, 2010).

En termes de résultats attendus, les démarches de modélisation seront identiques pour les trois espèces de lézard étudiées sachant que le Lézard ocellé pose deux défis spécifiques supplémentaires connus: d'une part, sa réponse au changement climatique peut varier localement comme l'a montré une étude récente conduite en Espagne: les auteurs montrent que la contraction ou extension de l'aire de répartition sont toutes deux possibles (CEIA-HASSE *et al.*, 2014) ; d'autre part, la caractérisation de la réponse chez cette espèce est sensible à la technique de modélisation corrélative choisie et dépend aussi des scénarios climatiques envisagés (ARAUJO *et al.*, 2006a ; CEIA-HASSE *et al.*, 2014).

L'objectif ultime est d'intégrer les données écophysiologiques collectées chez ces deux espèces de lézards pour évaluer leur risque d'extinction dans les Pyrénées occidentales en rapport avec le réchauffement climatique au cours du prochain siècle. En termes de résultat attendu dans quelques décennies de l'état de la biodiversité par rapport à la pression du changement climatique, l'idée sous-jacente est qu'une espèce – *Iberolacerta bonnali* – sera « perdante » tandis que l'autre – *Podarcis liolepis* – sera « gagnante ». Les travaux de modélisation en écophysiologie envisagés (cf. § Contexte de la modélisation écophysiologique) seront confrontés aux résultats naturalistes obtenus depuis plusieurs années par l'équipe de Cistude Nature (cf. section 8.6 du présent rapport).

Les premiers résultats issus des comptages réalisés pendant l'étude (cf § 8.6 du présent rapport) indiquent que les populations de Lézard de Bonnal paraissent stationnaires en termes de répartition spatiale (dimension altitudinale notamment) : si le Lézard de Bonnal le plus bas a été observé à 2030 m en 2017 contre 2047 m en 2018, l'altitude moyenne est passée de 2103 (n = 104) à 2104 m (n = 214). Par contraste, le Lézard des murailles semble avoir progressé d'environ 20 m en altitude. Cette progression semble de plus grande ampleur qu'imaginé, puisqu'entre 2011 et 2018, la hauteur maximale a progressé d'environ 50 m en sept ans. L'analyse conjointe de ces résultats de comptage avec des modélisations des températures historiques sur cette période récente pourra apporter un regard utile sur les mécanismes à l'œuvre, ou du moins sur le rôle possible des variations de température. Zipkin *et al.* (2017) proposent un cadre analytique unifié qui arrange les échelles spatiales et temporelles de ce type de recherche écologique (ZIPKIN *et al.*, 2017). Dans le cadre de sa thèse, F. Hugon pourra tester l'intérêt de ce modèle qui est une approche structurante pour l'intégration des données de détection-non détection et de comptage dans une seule analyse, de façon à estimer les paramètres utiles de dynamique de la population, et d'estimer conjointement l'abondance et les probabilités de détection individuelles pendant l'échantillonnage. A côté, de nouveaux modèles émergent pour modéliser la co-existence d'autres espèces compétitrices ou non. Parmi ces nouveaux modèles, deux pistes sont prometteuses : 1/ ceux développés par Brodie *et al.* (2017) pourraient permettre de mieux comprendre la dynamique différentielle observée du Lézard des murailles face au Lézard de Bonnal d'une part, et face au Lézard catalan d'autre part (BRODIE *et al.*, 2017), 2 / ceux implémentés par Friedman *et al.* (2017) qui permettent d'envisager la réussite des espèces de Lézards dans une logique stratégique où certaines stratégies sont gagnantes et d'autres non, conformément à la théorie évolutive des jeux (FRIEDMAN *et al.*, 2017).