

Présentation des indicateurs biologiques des effets du changement climatique sur la biodiversité en région Nouvelle-Aquitaine : les espèces sentinelles du climat

Presentation of biological indicators of the effects of climate change on biodiversity in the New Aquitaine region (South West, France): the climate sentinel species

Fanny MALLARD

Association Cistude Nature, Chemin du Moulinat, F - 33185 Le Haillan
[fanny.mallard@cistude.org]

Résumé - La compréhension des effets locaux du changement climatique sur la biodiversité est essentielle pour orienter les politiques environnementales et de gestion des espaces naturels. Le manque de connaissances au niveau régional a conduit au développement d'un programme de recherche « les sentinelles du climat ». L'hypothèse principale du programme est que les effets sur la biodiversité sont particulièrement détectables chez des espèces qui ont de faibles capacités de déplacements. Ces espèces « sentinelles du climat » seraient les premières à répondre aux variations climatiques locales par adaptation ou par extinction locale. À partir du territoire de la Nouvelle-Aquitaine, 20 indicateurs biologiques du changement climatique dans différents écosystèmes (dunaire, sec, humide, montagnard et forestier) ont été choisis : cortèges floristiques des écosystèmes, insectes (papillons, libellules, bourdons), amphibiens (*Rana pyrenaica*, *Hyla molleri*, *H. arborea*), reptiles (*Iberolacerta bonnali*, *Timon lepidus*, *Zootoca vivipara*, *Emys orbicularis*, *Vipera berus*) et mammifères (*Marmota marmota*, micromammifères). Cet article présente la méthode de développement de ces indicateurs et les hypothèses de recherche associées aux espèces sentinelles du climat.

Mots-clés - Indicateurs biologiques, changement climatique, espèces sentinelles, Nouvelle-Aquitaine, France.

Abstract - Understanding the local effects of climate change on biodiversity is essential to guide environmental and management policies for natural areas. The lack of knowledge at the regional level has led to the development of a research program "Climate sentinels". The main hypothesis of the program is that effects on biodiversity are particularly detectable in species that have low movement abilities. These "climate sentinel" species would be the first to respond to local climatic variations by adaptation or local extinction. From the territory of New Aquitaine (France), 20 biological indicators of climate change in different ecosystems (dune, dry, wet, mountain and forest) were chosen: plants communities of ecosystems, insects (butterflies, dragonflies, bumblebees), amphibians (*Rana pyrenaica*, *Hyla molleri*, *H. arborea*), reptiles (*Iberolacerta bonnali*, *Timon lepidus*, *Zootoca vivipara*, *Emys orbicularis*, *Vipera berus*) and mammals (*Marmota marmota*, micromammals). This paper presents the method of development of these indicators and the research hypotheses associated with climate sentinel species.

Keywords - Biological indicators, climate change, sentinel species, New Aquitaine region, France.

Introduction

À ce jour, il n'existe pas de suivi sur le long-terme, répertorié, normalisé, communiqué, permettant une analyse globale des effets du changement climatique sur la biodiversité à l'échelle régionale. Ces carences induisent de nouvelles démarches prolongeant les travaux de suivis de présence ou d'abondance des populations d'espèces associant la variable du climat. Consciente que ces lacunes doivent être comblées en priorité, l'association Cistude Nature s'est entourée de partenaires [Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique (CBNSA), Conservatoire d'espaces naturels d'Aquitaine (CEN Aquitaine), Groupe Mammalogique et Herpétologique du Limousin (GMHL), Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC), David Genoud – Dge, Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), Centre d'Études Biologiques de Chizé, etc.] pour mettre en place un programme d'étude pluriannuel : « les sentinelles du climat » (2016-2021). Le défi est de fournir des données, en lien avec des analyses, pour développer la connaissance fondamentale, pour raisonner en terme de fonctionnement multi-échelles. Dans ce contexte, il est essentiel de prendre en compte au mieux des variables couplées dans l'espace et le temps, de combiner différentes disciplines d'études théoriques et de travaux sur le terrain, en facilitant l'accès et la diffusion multi-publics des connaissances. Ce programme amène à poser en liminaire la question suivante : *Comment évaluer et prédire la réponse de la biodiversité régionale face au changement climatique ?*

Répondre à la problématique nécessite d'identifier des indicateurs pertinents et opérationnels à l'échelle régionale (Nouvelle-Aquitaine, France) pour évaluer l'état de la biodiversité, pour le projeter et tenter d'en prédire la réponse face au changement climatique. Les indicateurs permettent une réduction du nombre de mesures et de paramètres, simplifiant ainsi l'approche de phénomènes complexes. Leurs fonctions sont de décrire, distinguer, simplifier, agréger, évaluer et projeter les impacts du changement climatique sur la biodiversité. Leurs objectifs sont multiples. Ils permettent d'évaluer à la fois la viabilité, la durabilité, la résilience, la productivité, la vulnérabilité, en somme de faire le point sur l'état de santé de la biodiversité et de permettre aux utilisateurs de prendre des décisions et d'en évaluer les conséquences par un suivi adapté.

Les indicateurs utilisés dans le programme sont ainsi d'ordre « biologique » et concernent des observations, des dénombrements d'individus, d'espèces (ou groupes d'espèces) de flore et de faune, étudiés sur des sites dans plusieurs types d'écosystèmes. L'état et l'évolution de ces indicateurs sont reliés à un ensemble de mesures de paramètres météorologiques et climatiques à des échelles de temps et d'espace différentes. Ces données concernent la température, l'hygrométrie, la pluviométrie, la radiation solaire, la vitesse du vent, afin de dégager des tendances de l'impact climatique et de ses variations sur l'état de la biodiversité.

Trois types d'impacts des changements climatiques sur la biodiversité sont reconnus : (1) l'expansion, la persistance de l'espèce soumise au climat évolutif dans l'habitat (adaptation génétique, plasticité phénotypique), (2) le glissement, la migration vers des zones refuges plus appropriées, ou (3) la contraction, l'extinction locale, l'effondrement, le déclin (MALLARD, 2016a). Le nombre d'extinctions locales dépendra fortement de la capacité des espèces à se déplacer (FODEN *et al.*, 2008) ou à s'adapter. À l'échelle régionale ou locale, les espèces les plus menacées sont celles qui ont des restrictions spatiales latitudinales, altitudinales et des capacités de dispersion limitées (FEEHAN *et al.*, 2009). Les amphibiens, les reptiles, les micromammifères et quelques invertébrés ont des capacités de déplacement inférieures aux grands mammifères ou aux espèces volantes, etc. Nous posons ainsi l'hypothèse que ces espèces devraient être parmi les premières à répondre aux variations climatiques locales et elles constituent donc les « sentinelles du climat ». D'autre part, peu mobiles, elles sont

généralement facilement observables. Cela permet d'avoir des protocoles d'étude abordables, simples et moins coûteux. Elles ont de plus un aspect patrimonial affirmé (MALLARD, 2016a ; MALLARD, 2017a).

À partir de ces indicateurs, deux objectifs principaux sont alors distingués :

- Le premier est écologique et détermine les effets potentiels du changement climatique en les dissociant des autres facteurs anthropiques par le suivi de l'état de ces espèces sentinelles dans des milieux naturels de bon état écologique. La plupart des impacts sur les espèces se détecteront dans le temps, en lien avec leur temps de réponse et avec l'évolution des changements climatiques. Les effets ne peuvent pas être détectés facilement sur le terrain sur un temps court, ce qui implique des observations de plus grande sensibilité, en quantité suffisante, pour en caractériser leurs qualités et leurs incertitudes, pour associer un taux de couverture dans l'espace et le temps, etc.
- Le deuxième est biogéographique. À partir de ces données et de modèles associés, il s'agit d'évaluer, de caractériser, aux différentes échelles locales et régionales, la réponse prévisionnelle des espèces sentinelles du climat qui deviennent les indicateurs d'évolution.

Dans cet article, la première partie décrit la démarche de recherche utilisée pour le développement d'indicateurs de suivi des effets du changement climatique sur les écosystèmes terrestres par la recherche d'espèces ou de groupes d'espèces sensibles et indicatrices du changement climatique. La deuxième partie présente les hypothèses de réponses attendues associées aux espèces « sentinelles du climat » choisies.

1- Méthode de développement des indicateurs

1.1- Recherche bibliographique

La première étape consiste à réaliser un inventaire bibliographique structuré de manière à identifier les groupes sensibles au changement climatique. Un état de l'art de la connaissance des effets du changement climatique sur la biodiversité à l'échelle mondiale réalisé dans le cadre du programme a permis de lister des groupes d'espèces indicateurs couramment utilisés pour caractériser l'état des milieux naturels : mousses, fougères, gymnospermes et angiospermes, insectes (bourdons, odonates, lépidoptères), amphibiens (grenouilles et rainettes), reptiles (lézards, vipères, Cistude d'Europe) et petits mammifères (rongeurs, Marmotte des Alpes) (MALLARD, 2016a ; MALLARD, 2017b). Cette synthèse bibliographique s'appuie sur les articles scientifiques reconnus au niveau international par l'indicateur dit « impact factor » ou IF des revues (bases bibliographiques consultées : ScienceDirect.com complétée par ISI Web of science). Les mots clés de recherche ont été identifiés selon l'hypothèse de départ définissant les espèces sentinelles du climat. Les impacts retenus pour l'analyse concernent les réponses universelles reconnues : changements d'aire de répartition, phénologie et écophysiologie des espèces. L'ampleur et la direction des réponses au changement climatique varient selon les espèces (TAFANI *et al.*, 2013). Ces effets ont des conséquences différentes selon la vulnérabilité et la résilience des espèces, allant de la létalité aiguë à sub létale (MALLARD, 2016a).

Cette bibliographie, disponible sur le site internet de l'étude, montre que l'information pour la compréhension générale des réponses biologiques aux changements climatiques augmente rapidement depuis une vingtaine d'années. Le changement climatique est une pression qui affecte la structure et la dynamique du fonctionnement des écosystèmes par un large éventail d'effets qui peuvent être classés selon leurs natures et leurs caractéristiques : directs, indirects, induits et temporaires, permanents et cumulés (MALLARD, 2016a).

1.2- Sélection de la zone d'étude

Suite au travail bibliographique, il a été nécessaire de définir des zones d'étude pour identifier des espèces indicatrices. Ces différentes zones géographiques connaîtront des intensités variables du changement climatique (GIEC, 2013). Elles renferment des espèces avec des sensibilités différentes à la pression des modifications climatiques (BERTIN, 2008 ; Li *et al.*, 2013).

Le climat joue un rôle fondamental dans la répartition et la vie des êtres vivants. Il est caractérisé par plusieurs facteurs qui varient dans l'espace et le temps : température, précipitations, humidité, vent, radiation solaire, etc. Ceux-ci sont à relier à la théorie de la hiérarchie des niveaux d'organisation des systèmes écologiques (BUREL & BAUDRY, 1999). En pratique, ils se retrouvent à l'échelle du globe (zone climatique-biome/peuplement), de la région (macroclimat-écosystème/communauté), du site d'étude (mésoclimat-habitat/population) ou de l'individu (microclimat-environnement immédiat/organisme) (FAURIE *et al.*, 2011 ; MALLARD, 2014). Des approches multi-échelles adaptées sont alors nécessaires pour étudier l'effet du changement climatique sur la biodiversité. Les projections de l'évolution du climat à l'échelle de la planète avec des modèles mécanistiques ou statistiques permettent un niveau local de détail limité, niveau où se situe l'action. Les résultats doivent donc être affinés à des domaines spécifiés (LE TREUT, 2013).

La France bénéficie d'un climat tempéré subdivisé en divers climats régionaux ou macroclimats (FAURIE *et al.*, 2011). Cette diversité climatique implique la présence d'espèces ayant des sensibilités différentes à cette pression (BERTIN, 2008 ; Li *et al.*, 2013). Par conséquent, l'identification d'une zone géographique d'étude est une étape préalable du choix et du développement d'indicateurs dits « espèces sentinelles du climat ».

La région Nouvelle-Aquitaine est un laboratoire d'étude à ciel ouvert dans le sens où elle est à la fois particulièrement sensible à l'évolution du climat avec des zones climatiques contrastées et dotée d'une grande variété d'écosystèmes naturels. Elle fera face à des sécheresses estivales récurrentes dans les décennies à venir, à un réchauffement général marqué par des vagues de chaleur plus nombreuses, plus précoces et à un accroissement d'épisodes de pluie intense en été. Les évolutions moyennes sont caractérisées par des vents hivernaux moins violents, et des vents d'été plus énergétiques car associés à des tempêtes d'origine convective. À la différence des situations hivernales, le mécanisme pouvant amplifier les circulations atmosphériques d'été est connu : il est lié à la condensation de la vapeur d'eau. Il s'agit de risques fortement étayés, mais ne disposant pas de projections suffisamment établies en 2017. La Nouvelle-Aquitaine, avec sa très longue façade maritime, est également particulièrement sensible au relèvement moyen du niveau de la mer. Un relèvement de quelques dizaines de centimètres est anticipé pour la fin de ce siècle (LE TREUT, 2013). En termes topographiques, les zones de moyenne et haute montagne peuvent offrir des refuges significatifs pour les espèces les plus vulnérables à l'augmentation des températures.

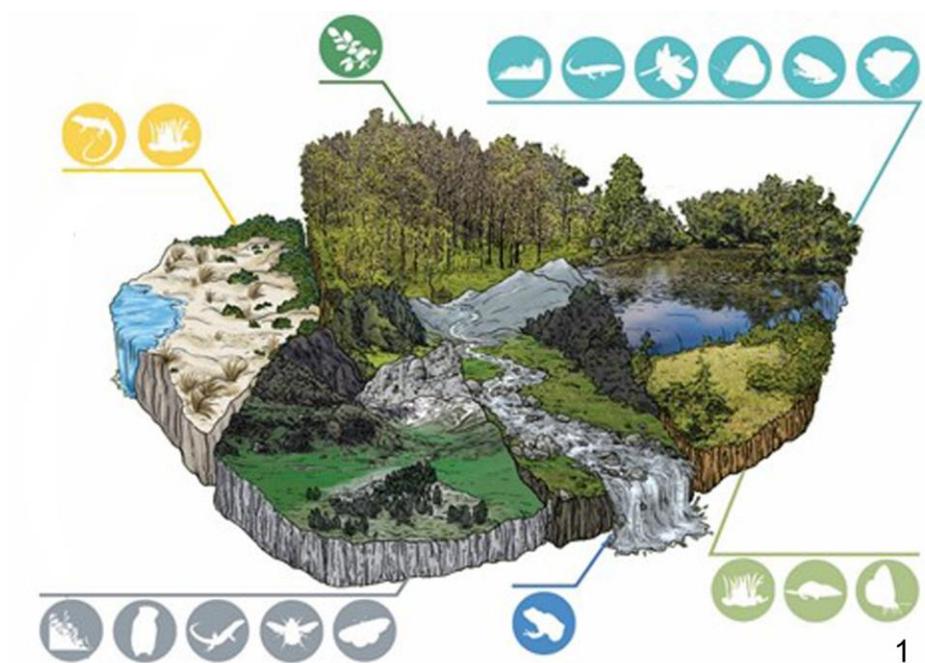


Figure 1. Milieux naturels étudiés et espèces sentinelles du climat (voir texte).

Figure 2. Lézard ocellé © Matthieu Berroneau.

Figure 3. Soufré/Fluoré (espèces à détermination délicate nécessitant une analyse des genitalia) © Fanny Mallard.

Figure 4. Souris à queue courte © Matthieu Berroneau.



3



4



À l'échelle de la région Nouvelle-Aquitaine, les différents types d'écosystème choisis dunaire, sec, humide, forestier et montagnard, ont des conditions climatiques spécifiques. Le changement climatique augmentera la caractéristique des milieux sec et dunaire, déficitaires en eau absorbable avec des sécheresses et canicules. Le milieu dunaire est également soumis à l'érosion marine. Le changement climatique induira un déficit hydrique dans les milieux humides. Il dégradera les conditions fraîches du milieu forestier spécifique de hêtraies relictuelles de plaine. Les milieux montagnards seront soumis aux variations amorcées du régime des pluies, aux changements de températures estivales et aux modifications du manteau neigeux (LE TREUT, 2013 ; MALLARD, 2016a).

1.3- Indicateurs

Les espèces rares ne sont pas uniquement celles les plus sensibles au changement climatique, les espèces communes d'un taxon, par sa variabilité spécifique, le sont également (PEARMAN *et al.*, 2011). À partir de l'état de l'art des connaissances (MALLARD, 2016a ; MALLARD, 2017a), de critères définis et d'une importante base de données empiriques des productions d'atlas de la flore (atlas en ligne : ofsa.fr) et de la faune en région Aquitaine (BERRONEAU, 2015 ; RUYS & COUZI, 2015 ; GOURVIL *et al.*, 2016), les espèces et groupes d'espèces indicateurs ont été développés pour ces 5 types d'écosystèmes (Fig. 1) : dunaire, secs, humides, forestiers et montagnards.

À partir du territoire de la Nouvelle-Aquitaine, 20 indicateurs du changement climatique dans différents écosystèmes ont été choisis. L'évolution des indicateurs de cortèges floristiques sera suivie pour chacun de ces milieux : communautés végétales des dunes littorales non boisées, des pelouses sèches calcicoles, des landes humides et tourbières, des lagunes du plateau landais, des rives d'étangs arrière-littoraux, de forêts à hêtre de plaine. Au sein de ces écosystèmes, les espèces et groupes d'espèces animales suivantes font l'objet d'étude : Lézard ocellé, populations de lépidoptères de pelouses calcicoles, communauté de micromammifères, populations de lépidoptères de landes humides et Azuré des mouillères, Lézard vivipare, Vipère péliade, leucorrhines et cortège d'odonates associé, Rainette ibérique et Rainette verte, Cistude d'Europe, Apollon et cortège de lépidoptères de montagne associé, cortège des bourdons, Grenouille des Pyrénées, Lézard de Bonnal et Lézard catalan, Marmotte des Alpes (MALLARD, 2016a ; MALLARD, 2017a) (Fig. 1).

2- Hypothèses de recherche des espèces sentinelles du climat

2.1- Écosystème dunaire

En Nouvelle-Aquitaine, le milieu dunaire et la côte sableuse subissent directement l'influence des vents, du niveau de la mer et des marées. Les conditions du milieu sont donc liées à la salinité et à la chaleur. L'augmentation d'épisodes ponctuels forts tels que les tempêtes peut rendre ce milieu vulnérable à l'érosion et au recul du trait de côte. Les phénomènes liés au changement climatique sont l'augmentation des températures moyennes et des chaleurs estivales, et une diminution des précipitations moyennes (LE TREUT, 2013).

D'après le CBNSA, certains cortèges floristiques des dunes littorales d'Aquitaine pourraient régresser ou disparaître. Les cortèges sont en partie composés d'espèces végétales thermophiles, notamment d'affinités méditerranéennes (LAFON *et al.*, 2015) ; une progression de ces communautés végétales est également possible.

D'après les observations de Cistude Nature, des espèces liées au cordon dunaire peuvent déplacer leur habitat en suivant le changement du trait de côte. Cependant, il est alors possible que ces espèces ne retrouvent plus leur type d'habitat comme par exemple le Lézard ocellé *Timon lepidus* (Daudin, 1802) (Fig. 2 *supra*). Cette espèce emblématique est thermophile et colonise le milieu dunaire entre l'embouchure de l'Adour et l'île d'Oléron. Elle se retrouve principalement sur ce cordon dunaire du littoral

atlantique (BERRONEAU, 2015). Le Lézard ocellé et ses habitats apparaissent en conséquence menacés par les phénomènes d'érosion liés aux montées des eaux et aux épisodes de tempêtes. D'après l'UPPA, l'augmentation de périodes très chaudes peut entraîner une baisse de l'activité des lézards voire une augmentation de leur température interne dépassant le maximum thermique critique du lézard. Pour se refroidir, les lézards se retirent dans les refuges plutôt que de subir ce risque entraînant des modifications de comportement, comme par exemple celui de la recherche de nourriture (SINERVO *et al.*, 2010).

2.2- Écosystème sec

Les pelouses calcicoles sont assimilées à un milieu sec. Elles sont réparties majoritairement en Dordogne, dans le Lot-et-Garonne et, dans une moindre mesure, en Gironde et en Pyrénées-Atlantiques. Ces habitats se développent sur des substrats calcaires et hébergent une flore particulière avec des espèces, adaptées à des sols pauvres en nutriments et supportant un déficit hydrique important en période estivale telles que *Rhaponticum coniferum*, *Dorycnium pentaphyllum*, *Argyrolobium zanonii*, *Fumana ericifolia*, *Anthericum liliago*, *Sideritis hyssopifolia* subsp. *guillonii* (ROYER, 1982 ; BOULLET & GEHU, 1984 ; LE FOULER, 2013 ; ABADIE *et al.*, 2014). D'après le CBNSA, le changement climatique pourrait modifier le cortège existant avec l'apparition et la propagation d'espèces thermophiles d'affinités méditerranéennes (LAVOREL & GARNIER, 2002 ; GRILLET *et al.*, 2006 ; VENNETIER & RIPERT, 2010 ; ZWICKE, 2013).

Les lépidoptères sont reconnus comme l'un des groupes indicateurs du changement climatique, car ils sont fortement liés aux plantes hôtes et nectarifères de l'habitat et ils sont poïkilothermes. Ils font l'objet de programmes de surveillance approfondie en France et à travers la Nouvelle-Aquitaine. D'après Cistude Nature et le CEN Aquitaine, le cortège des lépidoptères des pelouses calcicoles [l'Azuré du serpolet *Phengaris arion* (Linné, 1758), l'Argus bleu céleste *Lysandra bellargus* (Rottemburg, 1775), le Flambé *Iphiclides podalirius* (Linné, 1758), le Fluoré *Colias alfariensis* Ribbe, 1905, le Soufré *Colias hyale* (Linné, 1758) ; **Fig. 3 supra...**] peut évoluer en suivant le réchauffement climatique par l'apparition ou le développement des espèces à affinité méditerranéenne, telles que le Citron de Provence [*Gonepteryx cleopatra* (Linné, 1767)], et, suivant la modification des espèces végétales hôtes, par des extinctions locales d'espèces de lépidoptères. Ils sont également dépendants de la température du milieu pour leur activité (KLECKOVA & KLECKA, 2016). Leur optimum de développement, comme les autres insectes, sera influencé directement par l'évolution du paramètre température (COLINET *et al.*, 2015).

D'après Cistude Nature, en milieu sec, les espèces thermophiles peuvent étendre leur aire de répartition selon les nouvelles conditions climatiques favorables. Par exemple, le plus petit mammifère du monde, la Pachyure étrusque [*Suncus etruscus* (Savi, 1822)], et la Souris à queue courte [*Mus spretus* (Lataste, 1883)] (**Fig. 4 supra**), de masse corporelle 1,8 g et 12-18 g respectivement (VOGEL, 2012), sont des espèces d'affinité méditerranéenne. Elles se retrouvent en Nouvelle-Aquitaine le long de la vallée de la Garonne. Un réchauffement global pourrait permettre une extension rapide vers le nord de leurs aires de répartition respectives. En effet, il semble que, de manière générale, les petits mammifères souffriront moins du changement climatique, par une adaptation physiologique et physiologique plus rapide (LEVINSKY *et al.*, 2007 ; MCCAIN & KING, 2014 ; HETEM *et al.*, 2014).



Figure 5. Leucorrhine à front blanc © Matthieu Berroneau.

Figure 6. Rainette ibérique © Matthieu Berroneau.

Figure 7. Azuré des mouillères © Sandy Bulté.

Figure 8. Œufs d'Azuré des mouillères sur Gentiane pneumonanthe © Sandy Bulté.

Figure 9. Lézard vivipare © Matthieu Berroneau.

Figure 10. Vipère péliade © Matthieu Berroneau.



5

6

7

8

9

10



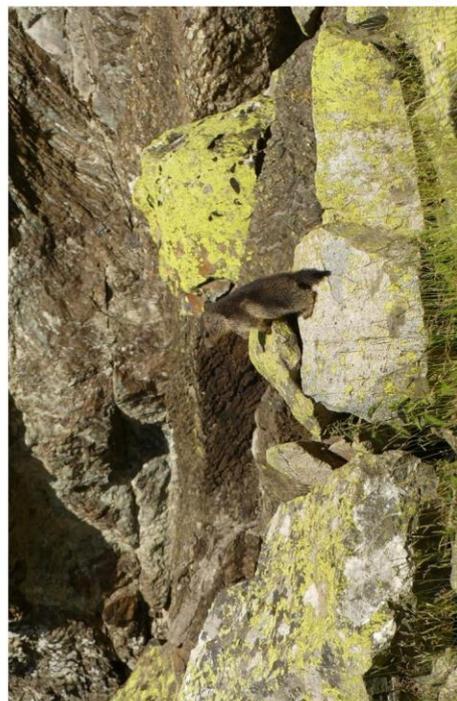
13



12



11



15



14



Figure 11. Cistude d'Europe © Fanny Mallard.

Figure 12. Apollon © Mathieu Molières.

Figure 13. Grenouille des Pyrénées © Matthieu Berroneau.

Figure 14. Lézard de Bonnal © Matthieu Berroneau.

Figure 15. Marmottes © Thomas Ruys.

2.3- Écosystème humide

Dans les milieux humides, et notamment dans les tourbières et les lagunes, les effets du changement climatique sont déjà constatés. À cause d'un réchauffement global et de périodes de sécheresse prolongées (LE TREUT, 2013), les espèces d'affinités boréales et humides risquent de disparaître au profit d'espèces à affinités plus chaudes et sèches.

La Nouvelle-Aquitaine offre de nombreux types de milieux humides de plaine. Les milieux les plus frais sont : les lagunes du plateau landais, les landes humides, les tourbières, les étangs arrière-littoraux et les marais côtiers.

Les lagunes du plateau landais sont notamment constituées de végétations amphibies au sein de pièces d'eau soumises naturellement aux variations du niveau des eaux. D'après le CBNSA, l'évolution de ces niveaux induite par le changement climatique pourrait entraîner la modification de l'emprise spatiale et topographique des communautés amphibies (BLANCHARD & LAMOTHE, 2003 ; LE FOULER & BLANCHARD, 2011a ; LE FOULER & BLANCHARD, 2011b).

Les odonates sont des espèces indicatrices des effets biologiques des changements climatiques (OTT, 2010). Les libellules réagissent rapidement, montrant des réponses fortes sur un laps de temps de 10 ans (FLENNER & SAHLÉN, 2008). La plupart dépendent fortement des conditions de l'habitat, par exemple la température de l'eau, la teneur en oxygène et la disponibilité de mares d'eau douce (JAESCHKE *et al.*, 2013). Les leucorrhines sont des odonates dépendant du milieu aquatique, notamment des lagunes landaises en Nouvelle-Aquitaine, pour leur reproduction. D'après les observations du CEN Aquitaine, certaines espèces vont voir leurs aires de répartition locales réduites avec la régression des lagunes. La Leucorrhine à front blanc [*Leucorrhinia albifrons* (Burmeister, 1839)] (**Fig. 5**) est inscrite sur la liste rouge de l'IUCN et fait partie des espèces protégées en France et d'intérêt communautaire potentiellement sensibles au changement climatique.

Certains amphibiens de milieux frais semblent fortement menacés par le changement climatique (ARAÚJO *et al.*, 2006) tels que, d'après Cistude Nature, la Rainette ibérique (*Hyla molleri* Bedriaga, 1889) (**Fig. 6**) et la Rainette verte [*H. arborea* (Linné, 1758)]. La Rainette méridionale (*Hyla meridionalis* Boettger, 1874) est une espèce d'affinité méditerranéenne plus thermophile qui pénètre dans certains milieux où *H. molleri* et *H. arborea* sont présentes (BERRONEAU, 2015). Un rapport de force entre ces deux espèces est très certainement lié aux conditions climatiques locales et pourrait évoluer en faveur de *H. meridionalis*.

D'après le CBNSA, les habitats de landes humides et tourbières sont particulièrement sensibles aux épisodes de sécheresse et de canicule intense. Les tourbières forment des reliques glaciaires en Nouvelle-Aquitaine. En effet, les végétations qui les composent trouvent leur optimum dans les régions froides (boréo-montagnardes) où la décomposition de la matière organique en condition anaérobie est fortement réduite. Comme les landes humides et les bas-marais acidiphiles, elles sont adaptées à un engorgement plus ou moins régulier par des eaux pauvres en nutriments et acides. Ces contraintes permettent le développement d'une flore strictement inféodée

à ces milieux (*Menyanthes trifoliata*, *Narthecium ossifragum*, *Gentiana pneumonanthe*, *Sphagnum fallax*, *Rhynchospora fusca*, *Drosera rotundifolia*, *Lycopodiella inundata*). Dans le contexte du changement climatique, ces végétations pourraient disparaître ou se raréfier au profit de végétations de landes plus sèches et de communautés moins oligotrophes.

D'après Cistude Nature et le CEN Aquitaine, les espèces du cortège de lépidoptères associé aux landes humides sont susceptibles d'être sujettes à des extinctions locales, par exemple le Fadet des laïches [*Coenonympha oedippus* (Fabricius, 1787)] strictement protégé de l'annexe 2 de la Convention de Berne, mentionné sur la liste des insectes strictement protégés de l'annexe IV de la Directive Habitats et inscrit sur la liste rouge des insectes de France métropolitaine. L'Azuré des mouillères [*Phengaris alcon* (Denis & Schiffermüller, 1775)] (Fig. 7) est également une espèce qui pourra être fortement impactée. Le cycle de vie complexe de cette espèce dépend obligatoirement de plusieurs hôtes : plante-hôte Gentiane pneumonanthe (*Gentiana pneumonanthe*) (Fig. 8) et fourmis-hôtes spécifiques *Myrmica scabrinodis* Nylander, 1846, *M. ruginodis* Nylander, 1846 ou *M. rubra* (Linné, 1758). L'été, les femelles pondent de 50 à 100 œufs répartis sur les boutons floraux de la plante-hôte, la Gentiane pneumonanthe, plante hémicryptophyte vivace, inféodée aux zones humides : prairies humides et zones marécageuses (MAES *et al.*, 2004). La Gentiane pneumonanthe est une plante à floraison tardive (août-septembre). Sa période de floraison risquant d'être plus précoce, la période de ponte de l'Azuré des mouillères pourrait être modifiée.

Les lézards, ectothermes, ont une phénologie contrainte par la température. La reprise d'activité post-hivernale et la vitesse de la gestation sont directement impactées par des variations climatiques qui déterminent les périodes propices aux activités de déplacement, d'alimentation et de reproduction. Le climat influence également la température corporelle de l'organisme et donc la vitesse des processus physiologiques. Les populations de Lézard vivipare (*Zootoca vivipara* (Lichtenstein, 1823)) (Fig. 9), une espèce des milieux froids cantonnée aux landes à molinie, sont particulièrement sensibles au réchauffement climatique (CHAMAILLE-JAMMES *et al.*, 2006 ; MARQUIS *et al.*, 2008 ; MASSOT *et al.*, 2008). Abondante en altitude, l'espèce est beaucoup plus rare en plaine où elle se cantonne à des milieux de landes humides (BERRONEAU, 2015). D'après Cistude Nature, la modification et la disparition de ces milieux frais entraîneraient une possible extinction locale de l'espèce.

Les ectothermes terrestres comme les vipères utilisent principalement des moyens comportementaux pour réguler leur température corporelle et optimiser leurs performances. La thermorégulation peut imposer des contraintes physiologiques et augmenter par exemple les pertes hydriques. D'après le Centre d'Études Biologiques de Chizé et le GMHL, en Nouvelle-Aquitaine, l'espèce boréale, la Vipère péliade *Vipera berus* (Fig. 10), présente des pertes hydriques supérieures à une autre espèce, la Vipère aspic *Vipera aspis* (Linné, 1758). La Vipère péliade *V. berus* (Linné, 1758) est plus vulnérable aux changements de précipitation en limite sud de son aire de distribution (LOURDAIS *et al.*, 2004 ; GUILLON *et al.*, 2013). *V. berus* devient une espèce indicatrice de la modification de l'humidité et des températures dans les milieux humides du Plateau des Millevaches.

Les cortèges amphibies caractéristiques et spécifiques des étangs à substrat sableux, aux eaux acides oligotrophes, comme pour la végétation des lagunes du plateau landais, sont constitués de végétations de pièces d'eau soumises naturellement aux variations du niveau des eaux (LE FOULER, 2012). D'après le CBNSA, l'évolution des niveaux pourrait entraîner la modification de l'emprise spatiale et topographique des communautés. Les rives des étangs arrière-littoraux de l'Aquitaine hébergent une flore particulière (*Lobelia dortmanna*, *Isoetes boryana*, *Caropsis verticillato-inundata*, *Littorella uniflora*). Ces étangs, isolés de la mer par un cordon dunaire, sont alimentés

exclusivement par les eaux des bassins versants. Issues du plateau sableux du triangle landais, ces eaux acides et oligotrophes favorisent le développement de communautés végétales originales. Ces végétations vivaces sont adaptées à des sols pauvres en nutriments et aux fluctuations des niveaux d'eaux qui déterminent leur agencement en ceinture le long d'un gradient topographique plus ou moins étendu. Selon le gradient hydrique, trois types de communautés végétales sont identifiées : aquatiques (immergées toute l'année), amphibies (immergées seulement une partie de l'année), terrestres (toujours émergées). D'après le CBNSA, dans le contexte du changement climatique avec des sécheresses et des canicules plus intenses, ces végétations amphibies et aquatiques pourraient disparaître ou se raréfier au profit des végétations strictement terrestres et moins oligotrophes.

La Nouvelle-Aquitaine est, à l'échelle du territoire national, la région accueillant le plus grand nombre de populations fonctionnelles de Cistude d'Europe *Emys orbicularis* (Linné, 1758) (**Fig. 11**). La cistude est une tortue d'eau douce exploitant majoritairement des habitats aquatiques stagnants ou peu circulants. Les marais côtiers où elle est présente pourront être impactés par la montée du niveau de la mer, la baisse des précipitations et des apports d'eau douce (LE TREUT, 2013). Elle est également tributaire du milieu terrestre pour assurer sa thermorégulation sur des sites d'insolation et pour sa reproduction sur des sites de ponte émergés. Par sa physiologie ectotherme, le cycle de vie de la Cistude d'Europe est directement tributaire des conditions thermiques. D'après Cistude Nature et l'IPHC, la Cistude d'Europe est susceptible d'être directement impactée par la modification de salinité dans les marais côtiers et par l'augmentation de la température. La distribution pan-européenne de la Cistude d'Europe suggère que cette espèce présente une certaine capacité d'adaptation face aux conditions environnementales. Préciser les mécanismes adaptatifs (physiologique, comportemental et écologique) est un prérequis pour évaluer, d'une part l'impact du changement climatique sur l'espèce, d'autre part les capacités de survie de celle-ci.

2.4- Écosystème forestier

Le milieu forestier subira le changement climatique, particulièrement les hêtraies relictuelles de plaine et leur cortège de flore associé, qui semble, d'après le CBNSA, en voie de régression du fait de variations du climat (LEBOURGEOIS *et al.*, 2005 ; PIEDALLU *et al.*, 2009 ; MARAGE & GÉGOUT, 2010 ; BERTRAND, 2012). Les forêts à hêtres de plaine sont particulièrement sensibles à des épisodes de sécheresse et de canicule plus intense. Au niveau de leur limite sud-ouest de répartition (bassin aquitain pour la présence en plaine), ces forêts sont très localisées et se développent à la faveur de conditions atmosphériques très fraîches sur des versants exposés au nord ou en fond de vallon. Les hêtraies sont des reliques des époques glaciaires en plaine de Nouvelle-Aquitaine. Elles abritent une flore particulière d'affinité montagnarde, avec de nombreuses espèces rares au niveau régional (*Carex digitata*, *Euphorbia hyberna*). À l'avenir, elles pourraient disparaître ou se raréfier au profit de végétations forestières plus sèches et plus thermophiles (BERTRAND, 2012).

2.5- Écosystème montagnard

Le milieu montagnard est constitué de zones de gradients climatiques. Les différences de saisons devraient y être plus marquées (LE TREUT, 2013) impactant directement la phénologie et le gradient de répartition altitudinale des espèces des montagnes des Pyrénées. Les espèces des régions de montagne devraient être particulièrement touchées et susceptibles d'un risque d'extinction locale rapide (THOMAS *et al.*, 2004). La diminution du manteau neigeux et l'augmentation des températures du sol (LE TREUT, 2013) contribueront à l'évolution du milieu sur le plan écologique, milieu qui pourra alors être occupé par d'autres espèces moins spécialistes et plus opportunistes.

L'Apollon *Parnassius apollo* (Linné, 1758) (**Fig. 12**) est une espèce de papillon sensible au changement climatique. La population *P. apollo* a diminué en Europe de près de 30% depuis 2000 (VAN SWAAY *et al.*, 2010), localement, en lien avec le changement climatique (DESCIMON *et al.*, 2005). Une baisse des populations depuis les années 1960 suggère un déclin général pour cette espèce dans la chaîne de montagnes de la Sierra de Guadarrama, dans le centre de l'Espagne, où la température moyenne annuelle a augmenté d'environ 0,4°C par décennie depuis 1970 (WILSON *et al.*, 2005). Le déclin observé à haute altitude entre 1967 et 2008 proviendrait d'une diminution globale des populations sur toute la région et sur toutes les gammes d'altitudes, liée au climat. Cela a réduit la taille des populations, même à des altitudes élevées, conduisant à des extinctions locales (WILSON *et al.*, 2015). Les résultats obtenus depuis 2006 indiquent l'importance de la qualité de l'habitat local pour la persistance de la population (WILSON *et al.*, 2015). D'après Cistude Nature, le suivi du cortège des lépidoptères de l'habitat de pelouses montagnardes à *Parnassius apollo* semble pertinent pour étudier l'évolution du cortège par rapport au changement climatique dans les Pyrénées.

Dans la littérature, il a été démontré que le changement climatique perturbe les interactions plante-pollinisateur par une homogénéisation de la diversité des proboscis [trompes] (CORBET, 2000), pouvant entraîner une régression des populations de certaines espèces de bourdons (BOMMARCO *et al.*, 2012), voire sur le long terme conduire à la disparition locale des espèces de bourdons, notamment celles adaptées au froid (PRADERVAND *et al.*, 2014), par exemple une espèce comme *Bombus pyrenaicus* Pérez, 1879. D'après plusieurs experts dont David Genoud - DGe, sur le long terme, les bourdons de basse altitude (planitiaire) devraient remonter en haute altitude. D'autres paramètres influenceront certainement les communautés de bourdons tels que la phénologie (espèces vernalles vs espèces estivales) et la stratégie sur la collecte et la conservation au nid de la ressource (nourrissage des larves par régurgitation « pollen storers » par rapport au nourrissage par pelotes de pollen et nectar ou de miel « pocket makers ») (LEFEVRE & PIERRE, 2001).

Endémique de l'ouest des Pyrénées, la Grenouille des Pyrénées (*Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993) (**Fig. 13**) est la seule grenouille strictement torrenticole de France métropolitaine. Elle se reproduit dans des torrents frais et oxygénés du Pays Basque et de la vallée d'Aspe. Durant leur période de croissance, les têtards se réfugient dans les vasques des ruisseaux où ils tentent de résister à la force du courant (BERRONEAU *et al.*, 2015). D'après Cistude Nature, l'évolution des débits de début de saison sous l'effet du changement climatique influencerait fortement la réussite de reproduction de cette espèce en entraînant la mortalité accrue des têtards.

Les espèces de lézards d'altitude, endémiques des Pyrénées telles que le Lézard de Bonnal *Iberolacerta bonnali* (Lantz, 1927) (**Fig. 14**), semblent fortement menacées par le changement climatique (ARAÚJO *et al.*, 2006). Il vit principalement entre 1800 m et 2200 m d'altitude. La principale menace qui semble peser sur cette espèce est l'élévation des températures. D'après Cistude Nature et l'UPPA, le changement climatique permettrait la remontée d'espèces compétitrices [par exemple le Lézard des murailles *Podarcis muralis* (Laurenti, 1768)] entraînant à terme la disparition des espèces d'iberolézards, dont le Lézard de Bonnal (POTTIER *et al.*, 2014). Une éventuelle hausse de température pourrait aussi favoriser une expansion altitudinale du Lézard catalan, un lézard d'affinité ibérique. Abondant en Espagne, le Lézard catalan *Podarcis liolepis* (Boulenger, 1905) est localisé dans le sud-ouest de la France sur quelques affleurements rocheux du Pays Basque et de la vallée d'Aspe. Ce lézard n'a aujourd'hui été localisé qu'en dessous de 900 m d'altitude.

Des suivis dans les Alpes françaises ont permis de mettre en évidence que la diminution de l'épaisseur de la couche de neige, au cours des 20 dernières années,

avait un impact négatif sur la taille des portées de la Marmotte des Alpes [*Marmota marmota* (Linné, 1758)] (Fig. 15) (TAFANI *et al.*, 2013). D'après Cistude Nature, les Pyrénées étant sujettes au même phénomène de diminution de l'épaisseur de la couche de neige, la reproduction de la Marmotte des Alpes devrait être également impactée.

3- Conclusion

Par leur rapidité et leur intensité, les évolutions climatiques actuelles constituent des pressions (directes ou indirectes) majeures sur la biodiversité. Les observations et les projections du changement climatique indiquent que certaines espèces végétales et animales seront exposées à un risque accru d'extinction. Cependant, les réponses intrinsèques de la biodiversité restent encore largement peu suivies et méconnues. Le programme « *les sentinelles du climat* » propose une démarche globale innovante en écologie appliquée, sur une base scientifique pour suivre, comprendre, connaître les interactions entre les variations climatiques et la réponse de la biodiversité. Le travail en cours est effectué à une échelle régionale pertinente pour la mise en place de mesures de conservation : la Nouvelle-Aquitaine. Ce travail repose sur la recherche d'une clarification des impacts à court et long terme, de leurs niveaux d'influence négatifs ou positifs, de leurs caractères directs, indirects et induits sur les espèces animales, végétales et les divers écosystèmes. L'émergence de sous-branches de l'écologie liées aux activités anthropiques est relativement récente. Le concept « d'écologie du changement climatique » n'existe pas encore à notre connaissance. L'étude mise en place de l'écologie du changement climatique est ancrée dans une approche pluridisciplinaire, à l'interface principalement entre l'écologie et la climatologie, regroupant la recherche et l'expertise naturaliste.

Dans différents milieux de plaine, du littoral jusqu'aux milieux montagnards, à partir de critères liés à la problématique du changement climatique et de la biodiversité, des indicateurs de suivis d'état appelés « sentinelles du climat » ont été développés. Ces espèces ou groupes d'espèces ont été listés dans cet article. Ils sont choisis comme étant parmi les plus sensibles au changement climatique et ayant des capacités de déplacements réduites, pour assurer un suivi au niveau d'une région. Des recherches sur le terrain sont essentielles pour l'étude de ces espèces sentinelles, pour alimenter les données en interaction avec des modèles d'analyse et de projection. Cela nécessite des efforts de cohérence pour mettre en place des méthodes, des référentiels partagés pour aborder, compléter ou poursuivre les recherches en cours. Avec l'ensemble des partenaires du programme, des protocoles scientifiques de suivis couplés climatiques et biologiques standardisés ont été mis en place, testés et validés en 2016. Les diversités des milieux de plaine, du littoral jusqu'aux milieux montagnards sont ainsi considérées sur plus de deux cents sites qui seront suivis jusqu'en 2021. Ces données sont la base de projections des impacts futurs du changement climatique sur la biodiversité.

L'ensemble des données analysées permet d'alimenter le transfert d'informations vers les acteurs. Ce sont des informations nécessaires à l'élaboration de stratégies de conservation et à la promotion de politiques environnementales éclairées et volontaires. La prise de conscience des acteurs sera d'autant plus importante et acceptée que la méthode et les résultats de la recherche seront largement diffusés. Des outils de médiation sont développés et adaptés aux publics visés pour diffuser et rendre accessibles toutes les bibliographies, les moyens, les méthodes et les résultats du programme. Des projets scolaires sont également engagés avec les « Savanturiers » où des scientifiques accompagnent les enseignants pour développer leur projet en lien avec « Les sentinelles du climat ». Enfin, pour que chacun devienne acteur du programme, des sciences participatives sont mises en place sur l'étude de la phénologie d'espèces animales et végétales.

Remerciements

Nous remercions l'Union Européenne, la région Nouvelle-Aquitaine, le Département de Gironde et le Département des Pyrénées-Atlantiques pour leur soutien et le financement du programme « les sentinelles du climat ». Nous remercions l'équipe de Cistude Nature et également nos partenaires : Université de Bordeaux Montaigne/UMR PSSAGES CNRS, Université de Pau et Pays de l'Adour, Centre d'Études Biologiques de Chizé, IPHC CNRS/Université de Strasbourg, Conservatoire des Espaces Naturels d'Aquitaine, Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique, David Genoud-DGe, Groupe Mammalogique et Herpétologique du Limousin, Société entomologique du Limousin, etc. (<https://technique.sentinelles-climat.org/les-acteurs/>).

Références bibliographiques

- ABADIE J.-C., CAZE G. & CASTAGNE H., 2014. - Plan de conservation de six espèces végétales des coteaux calcaires du département de la Dordogne : *Arenaria controversa*, *Ranunculus paludosus*, *Lactuca perennis*, *Euphorbia seguieriana*, *Hypericum montanum*, *Spiraea hypericifolia* subsp. *obovata*. Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique, 436 p.
- ARAÚJO M.B., THUILLER W. & PEARSON R.G., 2006. - Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*, 33 (10) : 1712-1728. doi : 10.1111/j.1365-2699.2006.01482.x.
- BERRONEAU M., 2015. - Guide des Amphibiens et Reptiles d'Aquitaine. C. Nature, Le Haillan, Gironde, France : Association Cistude Nature, 180 p.
- BERRONEAU M., D'AMICO F., FOURNIER A., DEVAUX B. & CHAZAL R., 2015. - Trois années de suivi des populations françaises de *Rana pyrenaica* Serra-Cobo, 1993 (Amphibia : Ranidae) : premières données d'abondance des têtards. *Bulletin Société herpétologique de France*, 156 (4^e trimestre 2015) : 31-44.
- BERTIN R.I., 2008. - Plant Phenology And Distribution In Relation To Recent Climate Change. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 135 (1) : 126-146. doi : 10.3159/07-RP-035R.1.
- BERTRAND R., 2012. - Réponse spatio-temporelle de la végétation forestière au réchauffement climatique - Évaluation du remaniement de la végétation et caractérisation de l'effet des facteurs écologiques et géographiques le modulant à l'échelle de l'espèce et des communautés. Nancy : AgroParisTech, 312 p.
- BLANCHARD F. & LAMOTHE T., 2003. - Premiers éléments pour servir à l'étude floristique, phytosociologique et typologique des « lagunes » du Parc Naturel Régional des Landes de Gascogne (départements de la Gironde et des Landes). Volume 1 - Flore, habitats et fonctionnement écologique. Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique/PNR Landes de Gascogne, 164 p.
- BOMMARCO R., LUNDIN O., SMITH H.G. & RUNDLÖF M., 2012. - Drastic historic shifts in bumble-bee community composition in Sweden. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 279 (1727) : 309-315. doi : 10.1098/rspb.2011.0647.
- BOULLET V. & GEHU J.M., 1984. - Première contribution à l'étude des pelouses calcaires du Crétacé des Charentes, in La végétation des pelouses calcaires. GéoProdig, portail d'information géographique, <http://geoprodig.cnrs.fr/items/show/170802>. Consulté le 20/12/2017.
- BUREL F. & BAUDRY J., 1999. - Écologie du paysage: concepts, méthodes et applications. Éd. Tec & doc, 359 p.
- CHAMAILLE-JAMMES S., MASSOT M., ARAGON P. & CLOBERT J., 2006. - Global warming and positive fitness response in mountain populations of common lizards *Lacerta vivipara*. *Global Change Biology*, 12 (2) : 392-402. doi : 10.1111/j.1365-2486.2005.01088.x.
- COLINET H., SINCLAIR B.J., VERNON P. & RENAULT D., 2015. - Insects in Fluctuating Thermal Environments. *Annual Review of Entomology*, 60 (1) : 123-140. doi : 10.1146/annurev-ento-010814-021017.
- CORBET S.A., 2000. - Conserving Compartments in Pollination Webs. *Conservation Biology*, 14 (5) : 1229-1231.

- DESCIMON H., BACHELARD P., BOITIER E. & PIERRAT V., 2005. - Decline and extinction of *Parnassius apollo* populations in France-continued. In : KÜHN E., FELDMANN R., THOMAS J.A. & SETTELE J., Studies on the Ecology and Conservation of Butterflies in Europe, Vol. 1: General Concepts and Case Studies. Pensoft, Sofia/Moscow., p. 114-115.
- FAURIE C., FERRA C., MEDORI P., DEVAUX J. & HEMPTINNE J.-L., 2011. - Écologie: Approche scientifique et pratique. Tec & Doc Lavoisier, 531 p.
- FEEHAN J., HARLEY M. & VAN MINNEN J., 2009. - Climate change in Europe. 1. Impact on terrestrial ecosystems and biodiversity. A review. *Agronomy for Sustainable Development* (EDP Sciences), 29 (3) : 409-421. doi : 10.1051/agro:2008066.
- FLENNER I. & SAHLÉN G., 2008. - Dragonfly community re-organisation in boreal forest lakes: rapid species turnover driven by climate change? *Insect Conservation & Diversity*, 1 (3) : 169-179. doi : 10.1111/j.1752-4598.2008.00020.x.
- FODEN W., VIE J.C., ANGULO A., BUTCHART S., DEVANTIER L., DUBLIN H., GUTSCHE A., STUART S. & TURAK E., 2008. - Species susceptibility to climate change impact. In : J.-C. Vié, C. HILTON-TAYLOR & S.N. STUART (ed.), The 2008 Review of The IUCN Red List of Threatened Species. Switzerland : IUCN Gland.
- GIEC, 2013. - Changements climatiques 2013, les éléments scientifiques : extraits de la contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Geneva, Switzerland : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 204 p.
- GOURVIL P.-Y., SOULET D., COUANON V., SANNIER M., DROUET E., SIMPSON D. & VAN HALDER I., 2016. - Pré-Atlas des rhopalocères et zygènes d'Aquitaine. Synthèse des connaissances 1995–2015. France : CEN Aquitaine, LPO Aquitaine, 217 p.
- GRILLET P., CHEYLAN M. & DUSOULIER F., 2006. - Évolution des habitats et changement climatique. *Ecologia mediterranea*, 32 : 64.
- GUILLOM M., GUILLER G., DENARDO D.F. & LOURDAIS O., 2013. - Microclimate preferences correlate with contrasted evaporative water loss in parapatric vipers at their contact zone. *Canadian Journal of Zoology*, 92 (1) : 81- 86. doi : 10.1139/cjz-2013-0189.
- HETEM R.S., FULLER A., MALONEY S.K. & MITCHELL D., 2014. - Responses of large mammals to climate change. *Temperature*, 1 (2) : 115-127. doi : 10.4161/temp.29651.
- JAESCHKE A., BITTNER T., REINEKING B. & BEIERKUHNLIN C., 2013. - Can they keep up with climate change? – Integrating specific dispersal abilities of protected Odonata in species distribution modelling. *Insect Conservation and Diversity*, 6 (1) : 93-103. doi : 10.1111/j.1752-4598.2012.00194.x.
- KLECKOVA I. & KLECKA J., 2016. - Facing the Heat: Thermoregulation and Behaviour of Lowland Species of a Cold-Dwelling Butterfly Genus *Erebia*. *PLoS One*, 11 (3) : e0150393. doi : 10.1371/journal.pone.0150393.
- LAFON P., LE FOULER A., DUFAY J., HARDY F. & CAZE G., 2015. - Les végétations des dunes littorales non boisées d'Aquitaine : synsystème et synchorologie (*Euphorbia paraliae*–*Ammophiletea australis*, *Koeleria glauca*–*Corynephorosetia canescentis* p.p., *Scheuchzeria palustris*–*Caricetea fuscae* p.p.). Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique/DREAL Aquitaine, 114 p.
- LAVOREL S. & GARNIER E., 2002. - Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: Revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16 (5) : 545-556. doi : 10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x.
- LE FOULER A., 2012. - Le suivi des végétations des rives des étangs arrière-littoraux d'Aquitaine - Méthode et premiers éléments. Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique/DREAL Aquitaine, 79 p.
- LE FOULER A., 2013. - Le suivi des pelouses calcicoles d'Aquitaine - Méthodes et première lecture. Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique/DREAL Aquitaine, 104 p.
- LE FOULER A. & BLANCHARD F., 2011a. - Méthodologie d'évaluation et de suivi de l'état de conservation des lagunes du plateau landais et première lecture d'un échantillon de 86

- lagunes. Vol. 1 : méthodologie et premiers résultats. Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique/DREAL Aquitaine, 38 p.
- LE FOULER A. & BLANCHARD F., 2011b. - Méthodologie d'évaluation et de suivi de l'état de conservation des lagunes du plateau landais et première lecture d'un échantillon de 86 lagunes. Vol. 2 : Fiches descriptives et cartes de localisation des lagunes. Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique/DREAL Aquitaine, 211 p.
- LE TREUT H., 2013. - Les impacts du changement climatique en Aquitaine : Un état des lieux scientifique. Pessac, France : Presses Universitaires de Bordeaux, 360 p.
- LEBOURGEOIS F., BREDA N., ULRICH E. & GRANIER A., 2005. - Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19 (4) : 385-401.
- LEFEVRE D. & PIERRE J., 2001. - La biologie des bourdons. *Bulletin Technique Apicole*, 28 (4) : 159-170.
- LEVINSKY I., FLEMMING S., SVENNING J.C. & RAHBEK C., 2007. - Potential impacts of climate change on the distributions and diversity patterns of European mammals. *Biodiversity and Conservation*, 16 (13) : 3803-3816.
- LI Y., COHEN J.M. & ROHR J.R., 2013. - Review and synthesis of the effects of climate change on amphibians. *Integrative Zoology*, 8 (2) : 145-161. doi : 10.1111/1749-4877.12001.
- LOURDAIS O., SHINE R., BONNET X., GUILLON M. & NAULLEAU G., 2004. - Climate Affects Embryonic Development in a Viviparous Snake, *Vipera aspis*. *Oikos*, 104 (3) : 551-560.
- MAES D., VANREUSEL W., TALLOEN W. & DYCK H.V., 2004. - Functional conservation units for the endangered Alcon Blue butterfly *Maculinea alcon* in Belgium (Lepidoptera: Lycaenidae). *Biological Conservation*, 120 (2) : 229-241. doi : 10.1016/j.biocon.2004.02.018.
- MALLARD F., 2014. - Développement d'une méthode d'évaluation quantitative des effets des projets d'infrastructures de transport terrestre sur les milieux naturels. France : Université Nantes Angers Le Mans, 472 p.
- MALLARD F., 2016a. - Programme les sentinelles du climat. Tome I : Développement d'indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle-Aquitaine. Le Haillan, France : C. Nature, 86 p.
- MALLARD F. (coord.), 2016b. - Programme les sentinelles du climat. Tome II : Protocoles d'échantillonnage des indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle-Aquitaine. Le Haillan, France : C. Nature, 453 p.
- MALLARD F. (coord.), 2017a. - Programme les sentinelles du climat. Tome III : Cadre de la modélisation prédictive des réponses des espèces face au changement climatique en Nouvelle-Aquitaine. Le Haillan, France : C. Nature, 90 p.
- MALLARD F. (coord.), 2017b. - Programme les sentinelles du climat. Tome IV : Ajustement des protocoles d'échantillonnage et analyses exploratoires des indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle-Aquitaine. Le Haillan, France : C. Nature, 966 p.
- MARAGE D. & GEGOUT J.-C., 2010. - Réponses de quelques habitats naturels forestiers et de leurs espèces typiques au changement climatique. *Revue Forestière Française*, LXII (3-4) : 485-500.
- MARQUIS O., MASSOT M. & LE GALLIARD J.F., 2008. - Intergenerational Effects of Climate Generate Cohort Variation in Lizard Reproductive Performance. *Ecology*, 89 (9) : 2575-2583.
- MASSOT M., CLOBERT J. & FERRIERE R., 2008. - Climate warming, dispersal inhibition and extinction risk. *Global Change Biology*, 14 (3) : 461-469. doi : 10.1111/j.1365-2486.2007.01514.x.
- MCCAIN C.M. & KING S.R.B., 2014. - Body size and activity times mediate mammalian responses to climate change. *Global Change Biology*, 20 (6) : 1760-1769. doi : 10.1111/gcb.12499.
- OTT J., 2010. - Dragonflies and climatic change - recent trends in Germany and Europe. *BioRisk: Biodiversity & Ecosystem Risk Assessment*, 5 : 253-286. doi : 10.3897/biorisk.5.857.

- PEARMAN P.B., GUISAN A. & ZIMMERMANN N.E., 2011. - Impacts of climate change on Swiss biodiversity: An indicator taxa approach. *Biological Conservation*, 144 (2) : 866-875.
doi : 10.1016/j.biocon.2010.11.020.
- PIEDALLU C., PEREZ V., GEGOUT J.-C., LEBOURGEOIS F. & BERTRAND R., 2009. - Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*, LXI (6) : 567-593.
- POTTIER G., ARTHUR C.P., WEBER L. & CHEYLAN M., 2014. - Répartition des lézards du genre *Iberolacerta* Arribas, 1997 (Sauria : Lacertidae) en France : 3/3 : le Lézard de Bonnal, *Iberolacerta bonnali* (Lantz, 1927). *Bulletin Société herpétologique de France*, 148 : 425-450.
- PRADERVAND J.-N., PELLISSIER L., RANDIN C. F. & GUISAN A., 2014. - Functional homogenization of bumblebee communities in alpine landscapes under projected climate change. *Climate Change Responses*, 1 (1) : 1-10.
doi : 10.1186/s40665-014-0001-5.
- ROYER J.M., 1982. - Contribution à l'étude phytosociologique des pelouses du Périgord et des régions voisines. *Doc. Phytosoc.*, 6 : 203-220.
- RUYS T. & COUZ L., 2015. - Atlas des Mammifères sauvages d'Aquitaine. Tome 6 : Les rongeurs, les érinacéomorphes et les soricomorphes. Cistude Nature et LPO Aquitaine. France : C. Nature, 228 p.
- SINERVO B., MENDEZ-DE-LA-CRUZ F., MILES D.B., HEULIN B. *et al.*, 2010. - Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science*, 328 (5980) : 894-899.
doi : 10.1126/science.1184695.
- SWAAY C. VAN, CUTTELOD A., COLLINS S., MAES D. *et al.*, 2010. - European red list of butterflies. Gland, Switzerland : Luxembourg: Publications Office of the European Union, 47 p.
- TAFANI M., COHAS A., BONENFANT C., GAILLARD J.-M. & ALLAINE D., 2013. - Decreasing litter size of marmots over time: a life history response to climate change? *Ecology*, 94 (3) : 580-586.
doi : 10.1890/12-0833.1.
- THOMAS C.D., CAMERON A., GREEN R.E., BAKKENES M. *et al.*, 2004. - Extinction risk from climate change. *Nature*, 427 (6970) : 145-148.
doi : 10.1038/nature02121.
- VENNETIER M. & RIPERT C., 2010. - Impact du changement climatique sur la flore méditerranéenne: théorie et pratique. *In* : BARBAULT R. & FOUCAULT A., Changement climatique et biodiversité, Paris, éditions Vuibert , p. 75-87.
- VOGEL P., 2012. - New trapping method to survey for presence of the Etruscan shrew *Suncus etruscus*, the smallest mammal. *Mammal Review*, 42 (4) : 314-318.
doi : 10.1111/j.1365-2907.2012.00215.x.
- WILSON R.J., BENNIE J., LAWSON C.R., PEARSON D., ORTUZAR-UGARTE G. & GUTIERREZ D., 2015. - Population turnover, habitat use and microclimate at the contracting range margin of a butterfly. *Journal of Insect Conservation*, 19 (2) : 205-216.
doi : 10.1007/s10841-014-9710-0.
- WILSON R.J., GUTIERREZ D., GUTIERREZ J., MARTINEZ D., AGUDO R. & MONSERRAT V.J., 2005. - Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change: Elevational shifts accompany climate change. *Ecology Letters*, 8 (11) : 1138-1146.
doi : 10.1111/j.1461-0248.2005.00824.x.
- ZWICKE M., 2013. - Impacts d'une canicule sécheresse sur le fonctionnement et la structure des communautés végétales de l'écosystème prairial. Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 305 p.