

- *Démarche du programme*

La biodiversité est essentielle comme solution pour contribuer à l'adaptation au changement climatique, mais elle est impactée par cette pression. Elle décline actuellement 100 à 1 000 fois plus rapidement que ce qui est considéré comme son rythme d'évolution « naturel ». Selon les dernières estimations des démarches scientifiques, cette perte est exceptionnellement rapide et d'origine anthropique. Une sixième période d'extinction de masse est en cours. Parmi les principales causes, par sa rapidité, le changement climatique est une préoccupation majeure à prendre en compte pour les écosystèmes, pour la flore et la faune sauvages. La pression du changement climatique a la particularité d'alimenter et d'amplifier en rétroaction les autres impacts, tels que la modification ou le changement d'utilisation des terres, la fragmentation de l'habitat, la surexploitation, la pollution, l'appauvrissement des écosystèmes et la propagation des espèces exotiques envahissantes.

L'échelle régionale est un niveau de décision politique intermédiaire, pertinent pour la mise en œuvre d'actions de lutte contre le changement climatique, de préservation de la biodiversité et de médiation. À cette échelle, il est possible de mobiliser une communauté d'acteurs entre science et société et de la placer dans le cadre d'un processus de recherche. Cette « recherche-action » doit reposer sur une méthodologie scientifique indépendante de l'observateur. L'objectif est d'observer, de mesurer, d'analyser et de modéliser les effets du changement climatique sur l'état de la biodiversité, de proposer des solutions pour la conservation des espèces et d'en assurer le suivi dans le temps. Suite aux travaux du Comité Scientifique Régional sur le Changement Climatique en région Nouvelle-Aquitaine constatant le manque de connaissances au niveau régional, le programme de recherche « les sentinelles du climat » en région Nouvelle-Aquitaine a été mis en place. Cette région est un laboratoire à ciel ouvert pertinent par son contexte géographique. En effet, elle est particulièrement exposée au changement climatique et présente une grande variété d'écosystèmes naturels.

Pour mesurer l'état de la biodiversité qui est la clé de la démarche, le choix d'indicateurs permet une réduction du nombre de mesures. Ils simplifient l'approche de phénomènes complexes. Les indicateurs utilisés sont d'ordre biologique et concernent des espèces de flore et de faune étudiées dans leur milieu. L'état et l'évolution de ces indicateurs sont reliés à un ensemble de variables de la pression climatique mesurées localement à des échelles de temps et d'espace différentes. Ces données horaires, journalières et annuelles concernent la température, l'hygrométrie, la pluviométrie, la radiation solaire, la vitesse du vent, et permettent de dégager des tendances de l'impact de leurs variations sur l'état de la biodiversité années après années.

À partir d'un état de l'art des connaissances, de critères définis et d'une importante base de données empiriques des productions d'atlas de la flore et de la faune, des espèces et des groupes d'espèces « indicateurs » ont été développés pour 5 types de milieux naturels sensibles. Une vingtaine d'indicateurs dits « sentinelles du climat » ont été retenus en 2016. Ces espèces ont été sélectionnées selon les critères suivants : une capacité de déplacement limitée, être inféodées aux écosystèmes sensibles au changement climatique, avoir une biologie et une écologie connues, des observations faciles et objectifs de conservation.

L'évolution des indicateurs est suivie pour chacun des écosystèmes et habitats suivants :

- La flore : Communautés végétales des dunes littorales non boisées, des pelouses sèches calcicoles, des tourbières, landes tourbeuses et bas-marais acidiphiles, des lagunes du plateau landais, des rives d'étangs arrière-littoraux, de forêts à Hêtre de plaines;
- les insectes : les lépidoptères des pelouses sèches, de landes humides et des pelouses de montagne, avec deux études spécifiques pour les espèces *Phengaris alcon* et *Parnassius apollo* ; les Leucorrhines et cortège d'odonates associé des lagunes des Landes de Gascogne ; *Gomphocerus sibiricus* et le cortège des orthoptères associé des prairies et pelouses de montagne des Pyrénées-Atlantiques ;
- les amphibiens : *Hyla molleri* des lagunes du triangle landais ; *Hyla arborea* des mares des landes et du bocage picto-limousin ; *Rana pyrenaica* des torrents de montagne ;
- les reptiles : *Timon lepidus* des dunes grises du littoral aquitain ; *Zootoca vivipara* des landes humides et tourbières de Nouvelle-Aquitaine ; *Iberolacerta bonnali* et les lézards gris des affleurements et éboulis rocheux de montagne ; *Vipera berus* et les vipères des landes humides d'altitude ;
- les mammifères : *Marmota marmota* des pelouses et rocailles pyrénéennes.

L'objectif est ensuite de projeter les réponses mesurées de ces espèces sentinelles face au changement climatique à différentes échelles spatio-temporelles pour proposer des actions de conservation des espèces selon une démarche en 3 étapes clés.

- 1- La première étape appelée « Connaître » définit des indicateurs biologiques pour mettre en place un réseau de suivi des effets sur la biodiversité locale. L'hypothèse de recherche est que les effets locaux peuvent être étudiés à partir d'indicateurs d'espèces de flore et de faune à capacité de déplacement limitée, appelées sentinelles du climat. Chaque indicateur est associé à un protocole de suivi scientifique normalisé à l'échelle locale.
- 2- La deuxième étape « Comprendre » est la standardisation des analyses de données pour relier les variables du changement climatique aux variables des données biologiques de ces espèces sentinelles du climat. Trois échelles d'étude : 1) macro-écologique : les données régionales des observatoires régionaux permettent d'accéder aux données de présence ; 2) méso-écologique : sur des sites d'étude la mise en œuvre de protocoles de dénombrements complète les présences par des données d'abondance ; 3) micro-écologique : les données de sondes biomimétiques et des études en laboratoire permettent d'identifier la niche thermique et hydrique des espèces.

Le changement climatique n'est pas le seul facteur qui doit être mesuré. D'autres facteurs anthropiques sont également pris en compte via l'analyse du paysage selon des indices paysagers. Toutes ces données sont utilisées pour modéliser l'état des réponses des espèces face au changement climatique puis projetées selon les différents scénarios climatiques du GIEC jusqu'en 2100.

- 3- En troisième étape « Agir », les connaissances permettent de proposer une première réflexion d'actions pour protéger et prévenir l'extinction des espèces et de promouvoir la conservation.

L'objectif à terme serait de développer un programme de surveillance décennal en Nouvelle-Aquitaine au même pas de temps celui des climatologues, adapté à la biodiversité et qui peut être mis à jour régulièrement. Ainsi ce programme servira de système d'alerte, prédisant les zones qui

présentent le plus de risques et quand elles le deviendront, ce qu'il convient de mettre en place pour cibler les efforts de conservation et de restauration.

Ce programme original est également en cours de transposition en région Occitanie. La conservation des espèces nécessite d'étudier l'aire de répartition des espèces au-delà des limites administratives. Le programme étendu de Nouvelle-Aquitaine à la région Occitanie permettra la prise en compte d'une échelle d'action plus pertinente pour les espèces. Des échanges avec d'autres régions sont également en cours dans l'objectif de tisser un réseau d'action à l'échelle nationale.

La démarche du programme mise en place s'insère dans le domaine que nous appelons l'« écologie du changement climatique ». Elle est ancrée dans une approche pluridisciplinaire, à l'interface principalement entre l'écologie, la biologie de la conservation et la climatologie, ainsi qu'entre la recherche et l'expertise naturaliste, et entre la science et la société. L'« écologie du changement climatique » définie ici met en œuvre des actions d'adaptation au changement climatique s'inscrivant dans une démarche de recherche action.

La suite du programme est nommée « les sentinelles du climat 2.0 ». Elle viserait en complément des suivis mis en place lors du programme les sentinelles du climat à définir et à tester plus spécifiquement des actions de conservation de ces espèces sentinelles en collaboration avec les acteurs du territoire. Afin de construire les pistes de réflexion, un colloque sur le programme intitulé « de la connaissance à l'action » a réuni le 26 novembre 2021, les gestionnaires, les décideurs et les acteurs de la conservation à l'hôtel de région de la Nouvelle-Aquitaine. Il présentait l'avancée de la connaissance en écologie du changement climatique en région Nouvelle-Aquitaine et les nouveaux axes de recherche et d'action liés à la biologie de la conservation développés par milieux naturels. Cette conclusion reprend les éléments de conclusion de ce colloque : <https://youtu.be/zPdsvYb8-38>.

La démarche originale mise en place par Cistude Nature et ses partenaires en Nouvelle-Aquitaine est un programme reproductible. Les méthodes, les outils de traitement de données et le développement d'une communauté d'action, sont transférables à d'autres territoires. Le projet les sentinelles du climat 2.0 a également pour vocation de développer des échanges et des partenariats avec d'autres régions pour tisser le réseau d'action. Le programme en cours de transposition en région Occitanie s'articule en partenariat avec le coordinateur régional de l'association Nature en Occitanie. À l'échelle nationale des synergies peuvent être mises en place avec d'autres programmes comme le projet LIFE NaturAdapt coordonné par les Réserves Naturelles de France qui vise à intégrer les enjeux du changement climatique dans la gestion des espaces naturels protégés européens.

- ***Vers une conservation du milieu dunaire : protéger et restaurer la dune grise***

Le milieu dunaire et la côte sableuse subissent directement l'influence des vents, du niveau de la mer et des marées. Le changement climatique induit des menaces relativement rapides et directes (augmentation des sécheresses, canicules) et indirectes (érosions, déplacements de sables avec notamment l'ensablement de la dune grise et d'arrière-dune) sur les dunes. Par exemple, le trait de côte du secteur de l'Amélie dans le Médoc a reculé de 200 m entre 1965 et 2018. La dernière actualisation du rapport de l'Observatoire Aquitain fait état de reculs moyens du trait de côte de 2,5 m/an en Gironde et de 1,7 m/an dans les Landes. Sur la côte sableuse (de la Pointe du Médoc à l'embouchure de l'Adour), l'érosion estimée est de l'ordre de 20 et 50 mètres en moyenne respectivement pour les horizons 2025 et 2050. Ces changements impactent et impacteront les organismes qui vivent sur ces dunes.

La flore des dunes est une flore singulière et à valeur patrimoniale très élevée du fait de son adaptation aux contraintes climatiques de chaleur et de sécheresse, aux contraintes mécaniques d'ensablement et également à la pauvreté du sol. Les impacts seront à trois niveaux :

- 1) des substitutions de cortège avec des remplacements d'espèces le long du littoral,
- 2) des pertes d'espèces liées à des stress plus importants sur des végétations plus ouvertes et avec davantage de sable nu et des microhabitats moins diversifiés,
- 3) des pertes d'habitats liés à une séquence dunaire grise tronquée, c'est-à-dire la dune mobile qui sera directement en contact de la forêt,
- 4) dans certains cas des progressions d'espèces thermophiles indigènes (exemple *Osyris alba* une espèce méditerranéenne présente en Charente et dans le Médoc qui pourraient s'étendre vers le sud et à l'intérieur des terres) ou d'espèces exotiques (exemple *Pittosporum tobira* qui pourraient se déployer sur le littoral).

Le Lézard ocellé *Timon lepidus*, espèce emblématique thermophile est présente du cordon dunaire du littoral atlantique à l'embouchure de l'Adour et l'île d'Oléron. Les habitats préférentiels de *T. lepidus* se trouvent en dune grise. Le Lézard ocellé et ses habitats apparaissent ainsi fortement menacés par les phénomènes d'érosion liés aux montées des eaux et aux épisodes de tempêtes. Les projections suggèrent un déplacement progressif des populations du littoral dans les terres et des pertes d'habitat favorable de 32 à 44% par rapport à la surface de l'habitat actuel. De plus, l'activité en période chaude peut entraîner une température du corps dépassant le maximum thermique critique du Lézard ocellé. Pour se refroidir, les lézards se retirent dans des micro-refuges plutôt que de subir le risque de surchauffe entraînant des modifications de comportement, comme par exemple en diminuant le temps de recherche de nourriture ou de reproduction. Les modifications de son activité normale peuvent à terme entraîner un déclin des populations.

L'évolution du trait de côte semble un phénomène inexorable. Les actions proposées sont de restaurer des continuités écologiques, en reliant des patchs de dune grise sur un gradient sud-nord et en limitant les espèces exotiques qui peuvent altérer les fonctions et la diversité spécifique de la flore des dunes. Sur le gradient est-ouest, des tests d'ouverture de la dune boisée accompagnés d'un suivi de l'évolution des successions végétales et de l'utilisation de ces ouvertures pour le Lézard ocellé sont proposés. Sur le gradient nord-sud, l'identification des ruptures de dunes grises permettraient de recréer les continuités écologiques. Ces actions seront mises en place en partenariat avec les gestionnaires et acteurs du territoire, notamment l'ONF Office national des forêts.

• ***Vers une conservation des milieux secs de plaine : accompagner la méditerranéisation des pelouses calcicoles ?***

Les pelouses calcicoles sont réparties majoritairement en Dordogne, dans le Lot-et-Garonne et, dans une moindre mesure, en Gironde et en Pyrénées-Atlantiques. Ces habitats de pelouses sèches se développent sur des substrats calcaires et hébergent une flore particulière avec des espèces telles que *Rhaponticum coniferum*, *Dorycnium pentaphyllum*, *Argyrolobium zanonii*, *Fumana ericifolia*, *Anthericum liliago*, *Sideritis hyssopifolia* subsp. *guillonii* adaptées à des sols pauvres en nutriments et a un déficit hydrique important en période estivale. Cette végétation est associée à des espèces particulières dont les lépidoptères des pelouses calcicoles (Azuré du serpolet *Maculinea arion*, Argus

bleu céleste *Polyommatus bellargus*, Flambé *Iphiclides podalirius*, Fluoré *Colias alfacariensis*, Soufré *Colias hyale*, etc.).

Ce milieu et les espèces qu'il renferme sont sensibles à l'augmentation de la fréquence des températures maximales et la diminution des précipitations. Les extinctions locales de populations de lépidoptères se développeront par la modification des espèces végétales hôtes. Globalement les résultats du programme sur les lépidoptères de pelouses calcicoles et les travaux réalisés à l'échelle européenne montrent un appauvrissement des cortèges de lépidoptères. Des espèces, aujourd'hui communes des pelouses et identifiées comme potentiellement sensibles au changement climatique pourraient être prises en compte dans la gestion immédiate comme le Bel Argus (*Lysandra bellargus*). La création d'îlots de fraîcheur sur les pelouses accompagnerait le maintien et la création d'un réseau de pelouses ouvertes. A contrario, sur certains secteurs d'autres impacts vont se cumuler, dont la fermeture du milieu qui va également se combiner à cet effet du changement climatique.

Ces modifications de pressions climatiques s'appliqueraient sur les cortèges de flore et de lépidoptères avec l'apparition et la propagation d'espèces thermophiles d'affinités méditerranéennes déjà présentes en région. Les projections d'évolution du climat régional indiquent que les étés plus chauds et plus secs favorisent ces espèces dans des zones où elles sont pour l'instant absentes. Les espèces de flore typiques de pelouses calcicoles xérophiles (*Staehelina dubia*, *Brachypodium distachyon*, *Lavandula latifolia*, *Helichrysum stoechas*, *Fumana procumbens*, *Arenaria controversa*) sont réparties principalement dans les secteurs les plus arides et chauds de Nouvelle-Aquitaine, entre le nord-est du Lot-et-Garonne et l'Angoumois. *Fumana procumbens* illustre cette tendance avec une extension marginale (+25 à +32%) en périphérie de son aire actuelle à court et moyen terme. Également, d'après l'atlas européen et les connaissances actuelles sur l'écologie et les dynamiques de populations de lépidoptères, certaines espèces pourraient étendre leurs aires de répartition du sud-est de la France et/ou de l'Espagne : *Zizeeria knysna*, *Zerynthia polyxena*. Ceci conduit à réfléchir sur une gestion adaptée pour ces espèces comme par exemple la Diane (*Zerynthia polyxena*) en favorisant les aristoloches (genre *Aristolochia*). Cependant ces perspectives sont limitées par les faibles capacités de dispersion de l'espèce. La continuité des suivis mis en place dans le programme est essentielle pour connaître la vitesse d'évolution des cortèges et observer l'arrivée potentielle de nouvelles espèces.

Une action proposée est d'intervenir, de maintenir et de restaurer une mosaïque d'habitats de milieux ouverts et des îlots de fraîcheur en offrant des refuges microclimatiques pour les espèces animales lors des heures de températures extrêmes. Différents tests de gestion seraient réalisés et dirigés vers une gestion pastorale pour le maintien d'un habitat résilient, plus favorable à la diversité d'espèces qu'avec une gestion mécanique. Une autre action serait le maintien et la création de continuités écologiques pour que les espèces puissent se déplacer plus facilement vers des sites aux conditions climatiques plus favorables. Il s'agirait d'identifier des zones tests dans des contextes paysagers différents, avec plusieurs distances entre des coteaux calcaires. L'identification de ces zones de continuités écologiques en lien avec les scénarios climatiques futurs devra être élaborée en concertation avec les acteurs du territoire. Ces trames climatiques intégreraient également des dispositifs de politiques publiques existants comme les trames vertes et bleues.

- ***Vers une conservation des milieux forestiers de plaine : prévenir la régression potentielle et surveiller les forêts à Hêtre de plaines***

Les forts contrastes climatiques entre la plaine et les massifs montagneux sont associés à des spécificités floristiques. Les vallées d'Ossau et Aspe du massif pyrénéen, ainsi que le plateau de

Millevaches et les Monts d'Ambazac en Limousin bénéficient actuellement d'un climat frais (< 10°C) et bien arrosé (> 1100 mm/an) sans déficit hydrique. Cela permet ainsi le développement d'espèces d'affinités montagnardes, notamment de tourbières, de forêts à Hêtre et de pelouses psychrophiles. Aux plus basses altitudes, ces espèces peuvent également subsister dans des conditions microclimatiques fraîches en versants nord, dans des vallons encaissés, etc. Les forêts à Hêtre très localisées se développent dans des contextes microclimatiques particuliers, dans des conditions atmosphériques très fraîches, sur des versants exposés au nord ou en fond de vallon. Ces forêts sont des reliques glaciaires en plaines de Nouvelle-Aquitaine. Elles abritent une flore particulière d'affinité montagnarde, avec de nombreuses espèces rares au niveau régional (*Carex digitata*, *Euphorbia hyberna*).

Le changement climatique devrait contraindre les conditions favorables au maintien des arbres. Par exemple, le Hêtre (*Fagus sylvatica*) est déjà en situation de refuge (versants nord, vallons encaissés) dans une grande partie du Bassin aquitain. De 2021–2070 une régression modérée (–18 à –21%) est projetée en limite de son aire dans les secteurs de plaine du Limousin, du piémont pyrénéen et en Dordogne. Cette régression est associée à une progression en altitude dans les hautes vallées pyrénéennes. À l'horizon 2071–2100, la disparition prédite du Hêtre concernerait l'ensemble des zones de basses altitudes, dont l'étage collinéen inférieur (< 500m) en Limousin et dans le piémont pyrénéen. À l'avenir, elles pourraient ainsi disparaître ou se raréfier au profit de végétations forestières plus sèches et plus thermophiles et tendre vers un climax de chênaies-charmaies. Le maintien des suivis dans le programme concernera la vitesse de la modification de réponse du cortège et notamment la notion de dette climatique associée c'est-à-dire le décalage entre la vitesse du changement de la pression climatique sur les milieux et le temps de réponse des espèces qui ne s'exercent pas forcément au même rythme.

Une action proposée pour atténuer les effets du changement climatique serait d'augmenter la capacité de résilience de ces forêts par le maintien et la restauration de la diversité spécifique, par le maintien de classes d'âge variées, qui permet au milieu d'être plus résilient. Une stratégie globale à tester serait d'appliquer une gestion forestière douce dans ces milieux c'est-à-dire en évitant les coupes rases et d'une gestion dirigée en futaie irrégulière. Le maintien et la restauration des continuités écologiques forestières accompagneraient la migration naturelle des espèces vers des zones refuges.

- ***Vers une conservation des milieux humides : rôle des milieux humides pour atténuer les effets du changement climatique***

En région Nouvelle-Aquitaine, le triangle landais ou les Landes de Gascogne est une zone dominée par une pinède plantée et exploitée et des patches d'agriculture. Entre les pins, se retrouvent des milieux humides morcelés tels que les landes humides et les lagunes. À cause d'un réchauffement global et de périodes de sécheresse prolongées, les espèces d'affinités boréales et humides présentes dans ces milieux risquent de disparaître au profit d'espèces d'environnements plus chauds et secs.

Les lagunes du plateau landais sont notamment constituées de végétations amphibies au sein de pièces d'eau soumises naturellement aux variations de leurs niveaux. Les communautés végétales des lagunes du plateau landais hébergent une flore spécifique avec de nombreuses espèces patrimoniales (*Caropsis verticillatto-inundata*, *Littorella uniflora*, *Drosera intermedia*, *Luronium natans*, etc.) dont certaines à tendance psychrophile (*Utricularia minor*, *Pilularia globulifera*). Ces végétations sont adaptées à des sols, des eaux pauvres en nutriments et aux fluctuations des niveaux qui déterminent

leur disposition en ceintures autour de la pièce d'eau. Dans le contexte du changement climatique avec des sécheresses et canicules plus intenses, ces végétations amphibies et aquatiques pourraient disparaître ou se raréfier au profit des végétations strictement terrestres impactant les espèces rares et patrimoniales.

Avec des affinités boréo-montagnardes, les trois espèces de leucorrhines : *Leucorrhinia albifrons*, *L. caudalis*, *L. pectoralis* se retrouvent en limite sud-ouest de leurs aires de répartition dans les Landes de Gascogne. Ces populations risquent de se raréfier, voire de disparaître, si les températures moyennes augmentent et que le déficit de pression de vapeur s'installe. Pour le scénario intermédiaire de projection qui est le plus probable, RCP 4.5, la qualité des habitats de *Leucorrhinia albifrons* diminue au cours du temps de 28% à l'horizon 2100 en particulier pour les zones les plus proches de la côte et au nord du département de la Gironde. Seuls les habitats au centre du triangle landais restent favorables mais la qualité de l'environnement y est diminuée par rapport au présent (perte de 65%). Pour ce scénario RCP 4.5, la qualité des habitats de *Leucorrhinia pectoralis* baisse au cours du temps sur toute la zone d'étude. Mais certaines lagunes restent adaptées pour l'espèce. À l'horizon 2100, la perte est estimée à 33% par rapport au présent. À l'horizon 2100, les lagunes du triangle landais très favorables sont réduites par rapport au présent (perte de 81%).

La Rainette ibérique (*Hyla molleri*) est une espèce qui se reproduit dans les milieux humides frais du massif landais de type lagune. La Rainette verte (*Hyla arborea*) possède une répartition septentrionale étendue dont la limite sud atteint la frange ouest du Limousin. Ces deux espèces sont plus sensibles à la déshydratation que la Rainette méridionale (*Hyla meridionalis*). Les observations ont montré qu'une année très sèche avec moins 50 mm/mois au printemps semble défavorable aux populations de *H. molleri* comparée à une année très pluvieuse avec 82 mm/mois au printemps en 2018 (lagunes en eau jusqu'à fin juillet).

Les tourbières forment des reliques glaciaires en Nouvelle-Aquitaine. Les habitats de landes humides et tourbières seraient particulièrement sensibles aux épisodes de sécheresses et de canicules intenses. En effet, les végétations qui les composent trouvent leur optimum dans les régions froides (boréo-montagnardes) où la décomposition de matière organique en condition anaérobie est fortement réduite. Comme les landes humides et les bas-marais acidiphiles, la flore est adaptée à un engorgement plus ou moins régulier par des eaux pauvres en nutriments et acides. Par exemple, *Gentiana pneumonanthe* est une plante localisée dans des landes mésophiles à hygrophiles ou zones tourbeuses à paratourbeuses. Cette espèce connaîtrait d'abord une relative stabilité en termes de taux d'évolution pour 2021-2070 (+18% et 35%). En revanche, à l'horizon 2100, l'évolution chorologique tend vers une importante contraction de l'aire de répartition avec une régression régionale de -22%. 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 oligotrophiles.

Les espèces du cortège de lépidoptères associés aux landes humides sont susceptibles d'être sujettes à des extinctions locales, par exemple le Fadet des laïches (*Coenonympha oedippus*) ou encore l'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon*). Selon les scénarios climatiques les plus pessimistes, des espèces déjà classées vulnérables seront en quasi-disparition voire disparition en 2100 : *Phengaris alcon*, *Parnassius apollo*, *Coenonympha oedippus*, *Carterocephalus palaemon* ; ainsi que d'autres espèces *Plebejus argyrognomon*, *Brenthis hecate*, *Minois dryas*, *Cupido alcetas*, *Lycaena dispar*, *Aphantopus hyperantus*, *Cupido minimus*. *Phengaris alcon* ou l'Azuré des mouillères est une espèce principalement liée aux milieux ouverts humides avec la présence de son unique plante hôte en Aquitaine la Gentiane pneumonanthe (*Gentiana pneumonanthe*) ainsi que les colonies de fourmis du genre *Myrmica*. Pour l'ensemble des scénarios climatiques, la répartition a une tendance de diminution au cours du temps de plus de 80% en 2100 pour les scénarios les plus pessimistes. Une hypothèse de

remontée de l'espèce en altitude au-delà de 1004m expliquerait la persistance de l'espèce dans les massifs montagneux.

Le lézard vivipare (*Zootoca vivipara*) est également une espèce d'affinité climatique fraîche. Abondante en altitude, l'espèce est beaucoup plus rare en plaine où elle se cantonne à ces milieux de landes humides. Le changement climatique pourrait impacter fortement l'espèce par extinction locale des populations suite à la disparition de ses habitats en plaine et par l'entrée progressive de *Podarcis muralis*. En Nouvelle-Aquitaine, deux formes de reproduction existent chez cette même espèce, la forme ovipare (*Z. vivipara louislantzi*) présente dans le sud-ouest de la région et la forme vivipare (*Z. vivipara vivipara*). Les populations de la forme ovipare en Gironde sont étroitement associées à des conditions climatiques spécifiques (pluviométrie plus élevée). Les spécificités climatiques du triangle landais ont probablement une importance majeure dans le maintien de cette forme dans un secteur de basse altitude exposé à des températures élevées. Il est possible que la reproduction vivipare soit plus contraignante avec des besoins en eau plus élevés. L'accès à l'eau dans le milieu semble être un facteur important qui façonne le niveau de pertes hydriques. Les résultats des travaux expérimentaux menés sur la forme vivipare montrent une forte sensibilité thermique et hydrique pendant la phase de gestation. Les femelles exposées à des conditions chaudes et desséchantes ont une masse moins importante pendant la gestation et mobilisent leurs protéines musculaires pour compenser le manque d'eau. La comparaison de la sensibilité aux pertes hydriques avec le Lézard des murailles souligne la plus grande vulnérabilité des *Zootoca vivipara* aux pertes hydriques.

La Vipère péliade (*Vipera berus*) est une espèce à affinité climatique froide et est particulièrement vulnérable aux modifications climatiques influant sur la qualité de ses habitats et perturbant directement la physiologie et la phénologie de la reproduction. La limite sud de répartition de la Vipère péliade (*Vipera aspis*) se trouve dans le Massif central. En marge de répartition, les espèces à affinités climatiques froides sont particulièrement dépendantes de conditions climatiques et microclimatiques spécifiques. La Vipère aspic est une autre espèce de vipère présente en Nouvelle-Aquitaine. En combinant l'approche corrélative et mécanistique des différences marquées sont notées entre la Vipère péliade et la Vipère aspic. Les épisodes caniculaires ont des répercussions sur les températures corporelles des individus de Vipère aspic. En journée, les femelles évitent les températures critiques maximum (>35°C) en sélectionnant des microhabitats appropriés. Le réchauffement passif la nuit a également des conséquences délétères (mobilisations des réserves). Ces résultats obtenus chez la Vipère aspic offre une base de compréhension mécanistique pour la Vipère péliade. Cette espèce présente un taux métabolique plus élevé, les contraintes énergétiques devraient être encore plus marquées. Le taux métabolique élevé lui permet d'exploiter des zones froides mais devient très défavorable dans un contexte climatique de réchauffement diurne et nocturne. La Vipère péliade est particulièrement vulnérable aux conditions estivales qui correspondent à la période de gestation (juin à août). Enfin, les épisodes caniculaires entraînent une avance importante des dates de mises-bas mais génèrent aussi un amaigrissement plus important sur les femelles après la mise-bas. La répétition d'évènements extrêmes pourrait avoir des répercussions en affectant la dynamique de population.

L'ensemble des résultats montre une régression des espèces à affinité humides et fraîches avec l'augmentation des températures et des sécheresses au profit d'espèces adaptées au contexte plus sec. Le dispositif de suivis peut évoluer en augmentant le nombre de sites en ex-Poitou-Charentes et en mettant en place des suivis de niveaux et de température de l'eau et du sol. Les observations ont relevé l'impact fort des activités humaines périphériques des zones humides. Une étude comparative des réponses des espèces dans différents niveaux d'état de conservation des milieux déterminerait les seuils de résilience des espèces. Cette étude est cependant délicate du fait du cumul des pressions sur la biodiversité dans des milieux dégradés. Pour l'ensemble de ces habitats humides, les résultats

montrent l'importance du paramètre humidité. Il sera nécessaire de renforcer les actions de conservation interventionnistes sur ces habitats dans le futur qui sont les clés d'un bon état. Il s'agit du maintien d'un régime hydrologique suffisant (lutte contre le drainage et la baisse du niveau des nappes de surface), la restauration et l'augmentation de la surface des lagunes, la création de connexions des zones humides, et le renforcement des actions sur les espèces protégées en forte diminution. À l'échelle des sites et des paysages, une mosaïque de microhabitats est indispensable pour que les espèces puissent trouver des refuges climatiques. Une étude spécifique pourrait aborder la structuration de mosaïques paysagères optimale dans une optique de fonctionnalité globale (connexions écologiques et zones favorables) et celle de microrefuges frais à l'échelle du site en concertation avec les différents acteurs du territoire qui agissent et interagissent avec ces milieux.

- ***Vers une conservation des milieux de montagne : la vulnérabilité des espèces de hautes altitudes***

Le milieu montagnard est constitué de zones de gradients climatiques altitudinaux. Les différences de saisons y sont plus marquées, impactant directement la phénologie et le gradient de répartition altitudinal des espèces des montagnes des Pyrénées. Les espèces des régions de montagne seront particulièrement touchées et susceptibles d'un risque d'extinction locale rapide. La diminution de l'épaisseur du manteau neigeux et l'augmentation des températures du sol se combinent dans l'évolution du milieu qui peut alors être occupé par d'autres espèces, plus opportunistes et entraîner le déclin des espèces de haute altitude. Ce milieu est aussi occupé par des espèces endémiques, adaptées aux conditions extrêmes de la montagne.

Les espèces de haute altitude, comme l'Apollon (*Parnassius apollo*), semblent en régression en lien avec le changement climatique et la perte d'habitat. Strictement montagnarde, elle fréquente les pelouses rocailleuses, les éboulis, les clairières et lisières forestières ainsi que les bords de route où se développent ses plantes-hôtes. Elle affectionne les milieux thermophiles bien exposés et de ce fait s'observe rarement en versant nord, sauf en cas de fortes chaleurs l'été. D'après la modélisation, la probabilité de présence est corrélée à un nombre de jours de neige élevé (un nombre de jour supérieur à 50 est le plus favorable). Pour l'ensemble des horizons et dans le cas des scénarios climatiques, la répartition de cette espèce a une tendance à la diminution de 20 à 30% en RCP 2.6, de 10 à 73% en RCP 4.5 et de 34% à 97% en RCP8.5. Sur le site Arrious, il est remarqué une baisse des effectifs d'Apollon depuis 2017 qui devra être confirmée par les suivis des années suivantes mais qui montre un constat inquiétant sur ce site. Globalement, la moyenne du nombre d'espèces strictement inféodées au milieu montagnard sur l'ensemble des sites est en continuellement en baisse depuis 2018. Les suivis sur l'évolution du cortège montagnard ont montré de plus en plus d'observations de l'espèce de plaine le Demi-Deuil (*Melanargia galathea*). Pour l'ensemble des espèces de plaine, les résultats montrent des observations de ces espèces plus importantes en 2019 correspondant à l'année avec des températures maximales supérieures donc potentiellement plus favorables pour ces espèces.

Parmi les insectes, le nombre et la diversité des espèces d'orthoptères décroissent avec la latitude, et seules quelques espèces se rencontrent au nord dans des zones subarctiques ou à haute altitude dans les régions alpines. Dans la littérature, l'espèce de haute altitude *Gomphocerus sibiricus* était observée dans les Pyrénées espagnoles dès 1400 m dans la Vallée de Benasque alors que 19 ans plus tard, elle n'est présente qu'à partir de 1800 mètres. Dans le programme, cette espèce n'a pas été observée en dessous de 1888 m sur le massif du Pic de Chérue, et 90% de la population se retrouve au-dessus de 1975 m. Ces éléments semblent montrer que cette espèce monterait progressivement vers des altitudes plus élevées. Les suivis mis en place dans le cadre du programme sur le plus long terme pourront confirmer ou infirmer cette tendance. Le suivi de l'évolution du cortège d'espèces permettra

d'étudier l'éventuelle remontée progressive vers des altitudes plus élevées des espèces afin de se maintenir dans des conditions climatiques équivalentes.

Les espèces de lézards d'altitude, endémiques des Pyrénées, semblent aussi fortement menacées par l'élévation des températures, par exemple le Lézard de Bonnal (*Iberolacerta bonnali*). La remontée d'espèces compétitrices a été observée par exemple le Lézard des murailles *Podarcis muralis* à des altitudes où il était absent, dans les secteurs de présence du Lézard de Bonnal. Les projections montrent que le Lézard de Bonnal subirait une contraction de son aire de répartition en Pyrénées-Atlantiques jusqu'à un habitat résiduel au Sud-Est du département aux frontières de l'Espagne et des Hautes-Pyrénées. Elles indiquent une contraction progressive de l'habitat disponible, d'abord à l'ouest puis à l'est, quel que soit le scénario climatique. D'après les scénarios RCP 2.6 et 4.5 (sauf horizon lointain), une perte d'habitat de 18,2 à 27,6% est prédite. Enfin, à 2100, le scénario RCP 4.5 indique une perte de 65% de l'habitat et pour le RCP 8.5 une perte de 89,2% de l'habitat ; seules les populations au sud-ouest du département proche du lac d'Arrious survivraient. Les premiers résultats sur le terrain montrent que les aires de répartition semblent fixes de 2017 à 2021. En revanche, le Lézard des murailles semble s'étendre en altitude sur un des sites d'étude du Lézard de Bonnal. Sur le site d'Arrious, les déplacements d'aire chez le Lézard des murailles, avec une forte colonisation de l'espèce en altitude, sont clairement visibles depuis le début de suivi. Entre 2011 et 2017, l'altitude maximale du Lézard des murailles est passée de 2 045m à 2 082m. Entre 2017 et 2019, cette hauteur maximale est passée de 2 082m à 2 167m. Cette hausse s'est poursuivie en 2020 avec un Lézard des murailles observé à 2 175m. Le Lézard des murailles est toujours présent à basse altitude.

La diminution de l'épaisseur de la couche de neige semble être un impact négatif sur la taille des portées de la Marmotte des Alpes (*Marmota marmota*). Vingt années d'étude dans les Alpes ont montré que le changement climatique avait un effet sur le succès reproducteur des femelles. L'épaisseur de la couverture neigeuse est corrélée à la diminution de la taille des portées. La population pyrénéenne de marmottes pourrait montrer la même réponse. Les premiers effets du réchauffement pourraient être plus mitigés avec des gains et des pertes d'habitats locaux liés à un effet d'équilibre entre le désavantage de conditions plus chaudes en hiver (dépense d'énergie plus importante en hibernation) et l'avantage de pouvoir profiter d'une végétation fournie en sortie d'hibernation. Les premiers effets du réchauffement seraient de 11% à 46.7% de pertes d'habitat tous scénarios confondus à l'horizon 2100. Les effets à l'horizon lointain sont les plus négatifs pour les scénarios RCP 4.5 avec une perte de 19% en 2100 et RCP 8.5 avec une perte de 46.7% en 2100. L'influence de paramètres locaux sur 15 familles suivies depuis cinq ans dans la vallée Ossau montrent des variations interannuelles importantes dans le succès de la reproduction des marmottes avec trois années 2018, 2020 et 2021 où peu de marmottons ont été observés. Pour les deux sites les plus hauts en altitude, une baisse importante du nombre d'individus est constatée.

L'évolution des débits des torrents avec l'augmentation des crues printanières sous l'effet du changement climatique influencerait fortement la réussite de la reproduction de la Grenouille des Pyrénées (*Rana pyrenaica*), espèce endémique de l'ouest des Pyrénées, entraînant la mortalité accrue des têtards. En raison des faibles capacités de déplacement de l'espèce et du faible nombre de sites de présence, les différentes populations sont probablement déconnectées et isolées les unes des autres. Le changement climatique risquerait ainsi d'entraîner à moyen terme la disparition d'une ou plusieurs populations de *Rana pyrenaica*. Les projections indiquent une perte d'habitat en 2100 de -95% pour le scénario le plus pessimiste. Les premières analyses exploratoires montrent que les facteurs corrélés négativement à l'abondance des têtards sont liés aux printemps et hivers chauds et aux crues printanières. Les têtards sont probablement résistants aux crues tardives, mais sensibles aux crues de début de saison. Le constat semble inquiétant dans le secteur de la forêt d'Iraty. La reproduction est

en forte baisse sur les sites historiques de Larrau (pas de reproduction depuis 2018) et de Lecumberry. Seul le site d'Estérençuby continue à maintenir des effectifs importants.

Le maintien des suivis de surveillance est indispensable pour suivre l'évolution et la vitesse de ces phénomènes observés. Ils devront être complétés par des observations de niveaux de l'épaisseur de couche de neige ainsi que de date de fonte des neiges, des températures de l'eau pour les torrents et l'évolution des crues printanières, l'influence de la végétation, etc. En plus des menaces du changement climatique, d'autres menaces ont été observées sur le terrain et pourront se cumuler : l'augmentation de la pression touristique en montagne liée au contexte actuel de pandémie du COVID-19, des impacts de la pêche avec l'introduction de truites dans les torrents à Grenouille des Pyrénées et l'évolution des pratiques pastorales sur certains secteurs avec le passage d'un pâturage ovins à bovins. Il est essentiel de travailler sur une action de sensibilisation des acteurs à ces enjeux mais également en concertation notamment avec le Parc National des Pyrénées afin de sanctuariser les zones les plus sensibles, des zones refuges pour les espèces. L'objectif est de maintenir et de restaurer un bon état de conservation des milieux pour que les espèces puissent s'adapter à leur rythme aux changements climatiques et limiter les pertes de populations. Les massifs montagneux seront les derniers refuges climatiques pour de nombreuses espèces à l'avenir. Une action de conservation interventionniste a été proposée avec la translocation du Léopard de Bonnal dans des secteurs potentiellement favorables à l'espèce mais qui ne sont pas colonisés actuellement à cause de barrières naturelles.

- *Vers une stratégie régionale de conservation de la biodiversité : identification de refuges climatiques*

La biologie de la conservation est au cœur des grands défis sociaux et politiques planétaires comme le changement climatique. Son objectif est de permettre à la société de s'adapter pour prévenir et réduire les dommages écologiques. Pour cela, il faut générer et disposer d'informations scientifiques à partir desquelles des stratégies et des politiques de restauration efficaces peuvent être conçues, mises en œuvre.

Le programme « les sentinelles du climat » propose une démarche globale innovante combinant les enjeux de la biologie de la conservation et de l'écologie du changement climatique. L'étude est effectuée à une échelle régionale. L'objectif à terme est de développer un programme de surveillance décennal en Nouvelle-Aquitaine similaire à ce que font les climatologues utilisant des pas de temps de 30 ans. Ce programme pourrait servir de système d'alerte, prédisant quelles zones seront les plus à risque et quand elles le deviendront, ce qui pourrait aider à cibler les efforts de conservation et de gestion des espaces naturels.

Différentes méthodes ont été proposées pour identifier les secteurs vulnérables et les refuges climatiques. Les limites de la modélisation corrélatrice et les pistes d'amélioration sont multiples. L'intégration de variables biotiques liées aux capacités de dispersion des espèces est nécessaire pour affiner les potentialités de dispersion. La prise en compte des données floristiques et environnementales dans les régions limitrophes en Occitanie assurerait une meilleure modélisation de la niche écologique de certaines espèces et des projections plus fiables. Enfin les modélisations doivent également pouvoir prendre en compte l'occupation du sol et son évolution selon différentes trajectoires de société futures qui sont des notions complexes à aborder. Malgré ces limites de grandes tendances se dégagent, la diversité sera répartie de manière différente sur le territoire : plus faible en plaine avec l'expansion de peu d'espèces et plus forte dans le Plateau des Millevaches et le massif

pyrénéens qui seront les derniers refuges des espèces face au changement climatique. Les notions de vulnérabilité et de refuge climatique doivent être plus finement définis : quels indices et types de calculs ? Quels secteurs prioritaires ? Secteurs stables, secteurs où la diversité chute ou inversement, secteurs de refuges pour les espèces actuellement patrimoniales ?

Pour mettre en application les propositions de mesures de conservation proposées dans le programme, certains questionnements techniques sont à redéfinir. Le changement climatique menace désormais l'existence et la stabilité des écosystèmes. Quel en est le « bon état » de conservation ? Comment définir « un bon état » lorsque les écosystèmes changent constamment au fil du temps ? Quelle intervention humaine associer ? Un programme spécifique pourrait aborder les questionnements : comment évaluer, caractériser de manière quantitative et globale l'évolution de l'état des milieux et de leurs résiliences ? Quelles méthodes, outils techniques de gestion choisir pour arriver à un état de conservation défini ? Les gestionnaires ont une grande expertise de terrain sur les pratiques de gestion et testent de nombreuses actions. L'idée serait de rassembler l'ensemble de ces connaissances à l'échelle de la région et de les valoriser pour rédiger un guide de préconisation de conservation des espèces sentinelles du climat.

Le statut de protection des espèces peut être repensé. Les espèces protégées sont très sensibles au changement climatique avec une tendance statistique à la disparition sur le territoire. Faut-il mettre les efforts de conservation sur ces espèces vouées à disparaître ? Les résultats montrent que des espèces communes sur certains habitats peuvent devenir aussi vulnérables au changement climatique comme Bel argus (*Lysandra bellargus*) en pelouse calcicole. Pour l'instant ces espèces ne sont pas forcément classées à enjeux et donc pas forcément prises en compte dans la gestion. L'enjeu défini intrinsèquement par la conservation est de préserver une diversité spécifique importante pour permettre aux écosystèmes naturels d'être résilients face aux diverses pressions. En pratique les questions se posent : Quelles continuités écologiques pour anticiper les changements ? Comment faire évoluer le statut des espèces et prendre en compte ces enjeux climatiques dans les pratiques de gestion ? Le statut de conservation des espèces étant relié au paramètre financement, ce dernier détermine de fait la gestion.

Pour permettre aux espèces de se déplacer et trouver des refuges climatiques, les stratégies de conservation et de restauration des continuités écologiques doivent prendre en compte anticiper les réponses projetées. Comment prendre en compte ces continuités écologiques climatiques dans les dispositifs existants de trames vertes et bleues ? Des outils peuvent être développés pour prendre en compte les effets projetés du changement climatique dans les stratégies de conservation et mis à jour en continu par rapport au développement de la connaissance en écologie du changement climatique. L'ensemble des actions et de la stratégie de conservation régionale peut être retravaillée de concert avec les gestionnaires, les décideurs, les législateurs mais également tous les acteurs de la conservation. Les pistes seraient de travailler sur le développement d'une méthodologie d'actions à l'échelle communale et de regroupement de communes (Établissement public de coopération intercommunale). Cette échelle permettrait un travail de concertation avec les élus locaux et les acteurs du territoire. La formation des élus aux connaissances clés sur la conservation permettrait l'appropriation de ces enjeux.

La biologie de la conservation pose des défis à la philosophie traditionnelle des sciences. L'ensemble des pistes d'actions proposées amènent à des questionnements éthiques. La combinaison de la biologie de la conservation et de l'écologie du changement climatique remet en question les valeurs fondamentales de la science neutre, indépendante, et de la pratique de l'écologie de la restauration. En effet, des questionnements éthiques sont posés immédiatement notamment dans le cas de gestion

Les sentinelles du climat

interventionniste. Aucune autre espèce que l'*Homo sapiens* n'a jamais impacté, fragilisé toute la planète par son existence même. L'humanité n'a-t-elle pas en retour un devoir d'humilité envers ces espèces en les protégeant par toutes les actions possibles ? Il est probable qu'à l'avenir, les actions de conservation deviennent un processus sous-jacent, sans fin, difficile, en constante évolution, remise en question si les activités humaines ne s'inscrivent pas en harmonie avec toutes les espèces.