

Auteur : Fanny Mallard

- ***Changement climatique et biodiversité***

La biodiversité est essentielle comme solution pour contribuer à l'adaptation au changement climatique (UICN, 2017), mais elle est impactée par cette pression. La biodiversité décline actuellement 100 à 1 000 fois plus rapidement que ce qui est considéré comme son rythme d'évolution « naturelle » (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005 ; PIMM *et al.*, 2014). Selon les dernières estimations scientifiques, cette perte est exceptionnellement rapide et d'origine anthropique. Une sixième période d'extinction de masse est en cours (CEBALLOS *et al.*, 2015 ; CEBALLOS *et al.*, 2017). Parmi les principales causes du déclin de la biodiversité, par son ampleur et sa rapidité, le changement climatique est une préoccupation majeure à prendre en compte pour les écosystèmes, pour la flore et la faune sauvages (IPBES, 2019). Le changement climatique a également la particularité d'alimenter et d'amplifier 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 (IPCC, 2014a).

La combinaison du changement climatique et d'autres facteurs de pression anthropique réduira la capacité d'adaptation et de résilience de nombreuses espèces. Elle modifiera les écosystèmes et les paysages des régions tempérées comme en Europe, où elle conduira à des extinctions locales et régionales (MCKINNEY & LOCKWOOD, 1999 ; THOMAS *et al.*, 2004 ; FEEHAN *et al.*, 2009). L'ampleur, la vitesse et la direction de ces changements varient selon les régions. Les niveaux actuellement atteints restent faibles, mais les études sur l'évolution de la biodiversité montrent déjà que ces changements ont un impact sur les espèces des communautés végétales et animales (CAMERON & SCHEEL, 2001). Les projections indiquent qu'environ 20 à 30% de la biodiversité pourrait courir un risque accru d'extinction si les températures moyennes mondiales augmentent de plus de 2 à 3 °C au-dessus du niveau préindustriel (IPCC, 2014a ; BOZINOVIC & PÖRTNER, 2015 ; ALLEN *et al.*, 2018), sachant que le réchauffement climatique actuel est estimé à 1,07°C de 1850–1900 à 2010–2019 (IPCC, 2021). Pour relever le défi d'un avenir durable par la conservation de la biodiversité, cela nécessite davantage de données locales, de connaissances, d'actions et de suivis des interactions entre le changement climatique et la biodiversité.

Les effets directs sur la biodiversité liés au changement climatique sont difficiles à isoler des multiples facteurs de modifications des environnements, des facteurs qui se combinent dans le temps et dans l'espace. Le cas des écosystèmes terrestres illustre cette multiplicité d'interactions avec les impacts liés à l'aménagement du territoire brouillant notre compréhension (MALLARD, 2016a ; MALLARD & COUDERCHET, 2019). Ces incertitudes sont progressivement réduites grâce à des observations étalées sur le long terme, grâce à une meilleure compréhension des processus écologiques, par des techniques de traitements de données, par des choix de modèles complémentaires. Comprendre la réponse de la biodiversité au changement climatique pour mettre en place des stratégies de conservation nécessite: 1) de combiner les échelles régionale et locale (ROOT & SCHNEIDER, 2006), 2) de rassembler les données fiables disponibles en réalisant des observations de terrain avec des protocoles standardisés, 3) enfin communiquer des informations agrégées aux différents acteurs du territoire.

La compréhension et le suivi des effets locaux du changement climatique sur la biodiversité deviennent alors essentielle pour orienter les politiques environnementales et celles 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 » (2016–2021) (MALLARD & COUDERCHET, 2019). Il

pose en liminaire la problématique suivante : Comment évaluer et prédire la réponse de la biodiversité régionale au changement climatique ? Le défi est de développer les moyens, les méthodes pour la connaissance de ces fonctionnements multi-échelles, de coupler les variables intensives dans l'espace et dans le temps, de combiner en discussion différents regards disciplinaires, tout cela en facilitant la diffusion et la circulation multi-publics des connaissances.

- *La région Nouvelle-Aquitaine : un laboratoire d'étude à ciel ouvert*

L'échelle régionale est un niveau de décision politique intermédiaire pertinent pour la mise en œuvre d'actions de lutte contre le changement climatique (LE TREUT, 2013), de préservation de la biodiversité et de médiation (MALLARD & COUDERCHET, 2019). 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 l'impact 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 (LE TREUT, 2013) constatant le manque de connaissances couplées climat-biodiversité au niveau régional, le programme de recherche « sentinelles du climat » dans la région Nouvelle-Aquitaine a été mis en place (MALLARD, 2016a). Cette région est un laboratoire à ciel ouvert pertinent pour son contexte géographique océanique, montagnard et planitiaire. Elle est exposée au changement climatique et présente une grande variété d'écosystèmes naturels.

La Nouvelle-Aquitaine est une région administrative française créée par la réforme territoriale de 2015. Elle compte douze départements au total. Elle forme la plus vaste région de France (84 000 km²) et la 3^{ème} la plus peuplée de l'hexagone avec 6 millions d'habitants (Chiffre INED au 1er janvier 2021). Elle s'étend au sud-ouest de la France, en latitude des paysages pyrénéens de montagne jusqu'aux marges ligériennes au nord ; à l'ouest de la façade atlantique aux plateaux limousins du Massif central à l'est. La partie la plus septentrionale du secteur Poitou-Charentes s'étend sur des plateaux à vocation agricole et viticole. Dans le quart sud-ouest se situent les landes de Gascogne avec une forêt principalement constituée de pins de près d'un million d'hectares (Fig. 1).

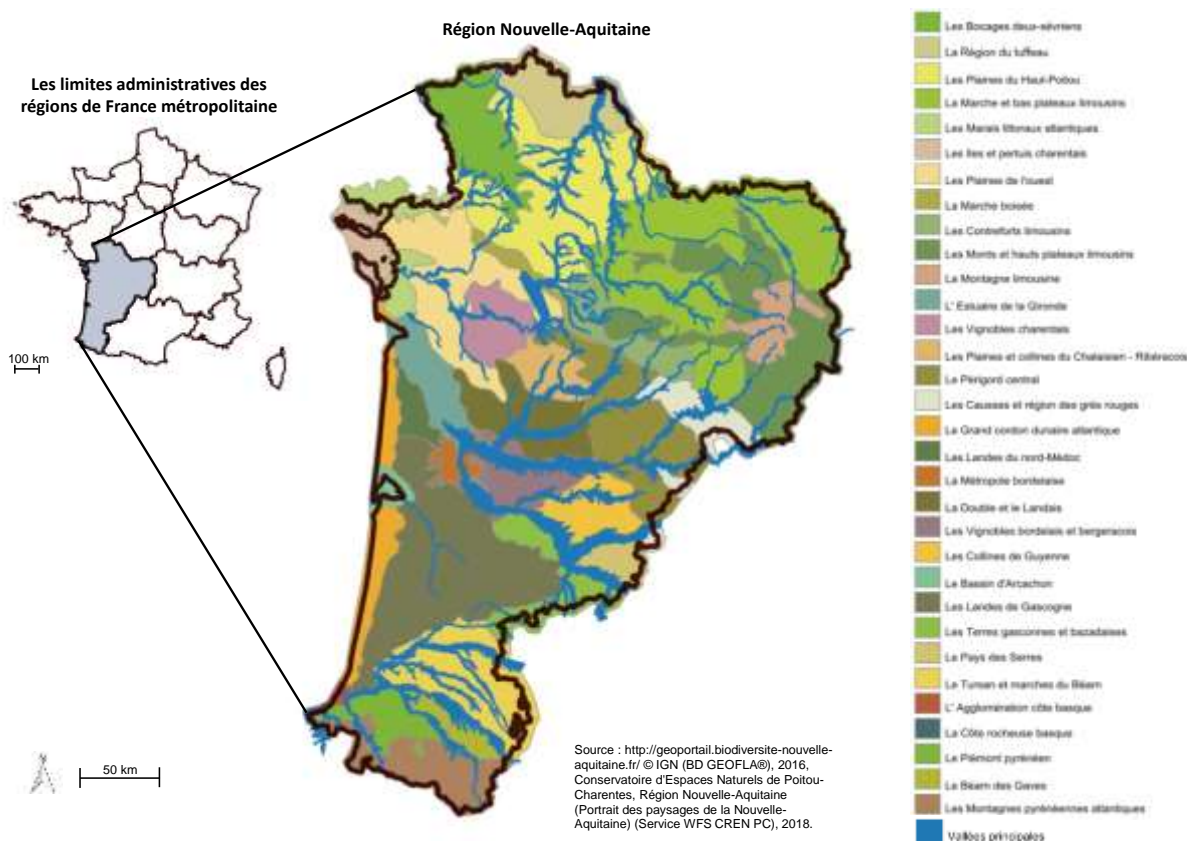


Fig. 1. Carte des secteurs paysagers de la région Nouvelle-Aquitaine (sud-ouest de la France).

La diversité des milieux naturels se cale ainsi sur un triple gradient, altitudinal de plaine à haute montagne, longitudinal de côte océanique à continent, latitudinal. Elle permet l'étude de plusieurs milieux naturels qui sont retenus pour leur représentativité d'un type d'écosystème régional : dunaire, sec, humide, forestier et montagnard, chacun ayant un climat local spécifique.

D'après Le Treut (2013), le changement climatique devrait augmenter la sécheresse et la température des milieux secs et dunaires, déficitaires en eau absorbable. Les dunes sont également soumises à l'érosion marine. L'élévation des températures devrait induire un déficit hydrique dans les milieux humides ; dégrader les conditions fraîches du milieu forestier spécifique de hêtraies relictuelles de plaine ; soumettre les milieux montagnards aux variations du régime des pluies, aux changements de températures estivales et aux modifications du manteau neigeux.

• *Sélection des indicateurs « sentinelles du climat »*

Pour mesurer l'état de la biodiversité, les indicateurs biologiques clés choisis pour le suivi permettent une réduction du nombre de mesures. Ils simplifient l'approche de phénomènes complexes et donnent une image de l'état de santé actuel de la biodiversité et une prospective potentielle. Cette « image » doit permettre aux gestionnaires de prendre des décisions d'anticipation et d'en évaluer les conséquences. Il s'agit donc d'identifier des indicateurs biologiques pertinents à l'échelle régionale pour à la fois évaluer l'état de la biodiversité et tenter de prédire sa réponse à la pression du changement climatique.

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 pression climatique mesurées à des échelles de temps et d'espace différentes. Les données horaires, journalières et annuelles concernent la température, l'hygrométrie, la pluviométrie, la radiation solaire, la vitesse du vent, etc. afin de dégager des tendances de l'impact de leurs variations sur l'état de la biodiversité année après année.

Trois types de réponses de la biodiversité face au changement climatique sont actuellement reconnus : (1) l'expansion, la persistance dans l'habitat par adaptation génétique ou plasticité phénotypique, (2) le glissement, la migration vers des zones refuges plus appropriées ou (3) la contraction, l'extinction locale, l'effondrement, le déclin (DAVIS & SHAW, 2001). Le nombre d'extinctions locales dépendra fortement de la capacité des espèces à se déplacer ou à s'adapter (FODEN *et al.*, 2008).

À l'échelle régionale ou locale, les espèces « indicatrices » les plus directement menacées ont des restrictions spatiales latitudinales et altitudinales et des capacités physiques de dispersion limitées (FEEHAN *et al.*, 2009). Celles qui sont choisies doivent être facilement observables, autorisant pour leur étude des protocoles simples et peu coûteux. Nous posons ainsi les hypothèses suivantes :

- ces espèces doivent être sensibles, parmi les premières à répondre aux variations climatiques locales et elles constituent alors les « sentinelles du climat », véritables modèles réduits dans l'espace et dans le temps de la réponse de la biodiversité au changement climatique ;
- il est « possible d'isoler » les facteurs climatiques de pression des autres facteurs dans leur dynamique d'évolution.

Un premier état de la connaissance des effets du changement climatique sur la biodiversité a permis de lister des groupes d'espèces couramment utilisés pour caractériser l'état des milieux naturels : mousses, fougères, gymnospermes et angiospermes, insectes, amphibiens, reptiles et mammifères. En 2016, 752 articles ont été ainsi recensés traitant du sujet du changement climatique et des différents taxons (flore, insecte, amphibien, reptile, oiseau, mammifère) (MALLARD, 2016a). Les mots-clés de recherche ont été identifiés selon notre hypothèse de départ définissant les espèces sentinelles du climat : les changements d'aire de répartition, de phénologie et d'écophysiologie des espèces.

À partir d'un 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 (ofsa.fr) et de la faune en région Aquitaine (BERRONEAU, 2015 ; RUY & COUZI, 2015 ; GOURVIL *et al.*, 2016), les espèces et les groupes d'espèces « indicateurs » ont été développés pour les 5 types de milieux naturels sensibles : dunaires, secs, humides, forestiers et montagnards (Fig. 1).

Les variables des phénomènes liés au changement climatique analysés en lien avec les conséquences sur la biodiversité de ces milieux sont l'augmentation des températures maximales, minimales, des moyennes et des niveaux des chaleurs estivales, la diminution des précipitations moyennes, l'hygrométrie de l'air (LE TREUT, 2013).

En Nouvelle-Aquitaine, le milieu dunaire et la côte sableuse subissent plus directement l'influence des vents, du niveau de la mer et des amplitudes des marées. Les conditions du milieu sont liées à la salinité. L'augmentation d'épisodes ponctuels forts tels que les tempêtes rend le milieu vulnérable à l'érosion et au recul du trait de côte (LE TREUT, 2013).

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. Le changement climatique pourrait modifier le cortège existant avec l'apparition et la propagation d'espèces thermophiles d'affinités méditerranéennes (MALLARD, 2016b).

Dans les milieux humides, 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. Les milieux les plus frais sont : les lagunes du plateau landais, les landes humides, les tourbières, les étangs arrière-littoraux et les marais côtiers.

Le milieu forestier, particulièrement les hêtraies relictuelles de plaine et leur cortège de flore d'affinité montagnarde, avec de nombreuses espèces rares au niveau régional (*Carex digitata*, *Euphorbia hyberna*), semble en voie de régression du fait de variations du climat. Les forêts à hêtres de plaine sont particulièrement sensibles à des épisodes de sécheresse et de canicule plus intenses. Elles 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. Ce sont des reliques des époques glaciaires en plaine. À l'avenir, elles peuvent disparaître ou se raréfier au profit de végétations forestières plus sèches et plus thermophiles (MALLARD, 2016b).

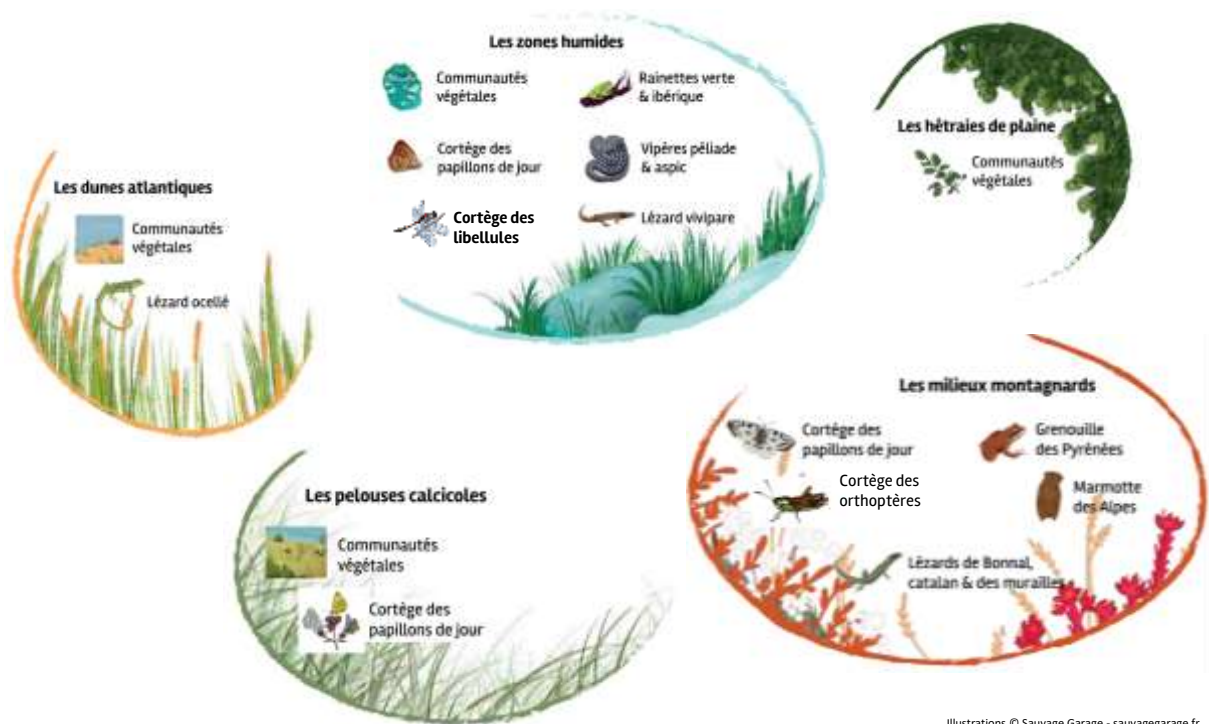
Le milieu montagnard est constitué de zones de forts gradients climatiques. Les différences de saisons y sont plus marquées (LE TREUT, 2013) impactant directement la phénologie et le gradient de répartition altitudinale des espèces des montagnes des Pyrénées. Les espèces des régions de montagne devraient 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 qui pourra alors être occupé par d'autres espèces moins spécialistes et plus opportunistes.

À partir des milieux sensibles du territoire de la Nouvelle-Aquitaine, une vingtaine d'indicateurs ont été choisis (Fig. 2). Ces espèces ont été sélectionnées sur les critères suivants : capacité de déplacement limitée, inféodées aux écosystèmes sensibles, sensibilité au changement climatique, biologie et écologie connues, observations faciles et espèces à enjeu de conservation (MALLARD, 2016a ; MALLARD, 2018 ; MALLARD & COUDERCHET, 2019).

Les indicateurs pour chacun des écosystèmes et habitats sont les suivants :

- la flore et les végétations des milieux dunaire, sec, humide, montagnard et forestier : communautés végétales des dunes littorales non boisées ; des pelouses sèches calcicoles ; des landes humides ; des tourbières, des lagunes du plateau landais, des rives d'étangs arrière-littoraux et de forêts à hêtres de plaine. Les cortèges floristiques concernent les spermatophytes et ptéridophytes excluant les bryophytes et lichens (complexes à appréhender). Concernant le suivi des forêts à hêtres, le champ d'investigation taxonomique concerne les spermatophytes, ptéridophytes et bryophytes (MALLARD, 2017b).
- les lépidoptères des pelouses sèches, des landes humides et des pelouses thermophiles montagnardes, avec deux études spécifiques sur les espèces : 1) *Phengaris alcon* écotype « *alcon* » (Denis & Schiffermüller, 1775) – Azuré des mouillères des landes et prairies humides tourbeuses à paratourbeuses ; 2) *Parnassius apollo* (Linnaeus, 1758) – Apollon et cortège lépidoptérique associé aux pelouses thermophiles montagnardes ;
- Leucorrhines et cortège d'odonates associés des lagunes des Landes de Gascogne ;

- *Gomphocerus sibiricus* (Linnaeus, 1767) et le cortège des orthoptères associés des prairies et pelouses de montagne des Pyrénées-Atlantiques ;
- *Hyla molleri* (Bedriaga, 1889) – Rainette ibérique des lagunes du triangle landais et *Hyla arborea* (Linnaeus, 1758) – Rainette verte des mares des landes et du bocage Pictolimousin ;
- *Rana pyrenaica* (Serra-Cobo, 1993) – Grenouille des Pyrénées des torrents de montagne ;
- *Timon lepidus* (Daudin, 1802) – Lézard ocellé des dunes grises du littoral aquitain ;
- *Zootoca vivipara* (Lichtenstein, 1823) – Lézard vivipare des landes humides et tourbières de Nouvelle-Aquitaine ;
- *Iberolacerta bonnali* (Lantz, 1927) – Lézard de Bonnal et les lézards gris des affleurements et éboulis rocheux de montagne ;
- *Vipera berus* (Linnaeus, 1758) – Vipère péliade et les vipères des landes humides d'altitude ;
- *Marmota marmota* (Linnaeus, 1758) – Marmotte des Alpes des pelouses et rocailles pyrénéennes.



Illustrations © Sauvage Garage - sauvagegarage.fr

Fig. 2. Indicateurs biologiques espèces ou groupes d'espèces sentinelles du climat en fonction des milieux naturels sensibles au changement climatique.

• **Mise en place pratique d'une démarche scientifique d'action**

Ces indicateurs choisis dans les écosystèmes de référence constituent la base du programme « les sentinelles du climat » pour définir des suivis d'état multi-écosystèmes, multi-espèces à long-terme des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle-Aquitaine. L'objectif est de projeter les réponses de ces espèces sentinelles à différentes échelles spatio-temporelles pour

proposer des actions de conservation des espèces selon une démarche de recherche en 3 étapes clés (Fig. 3).

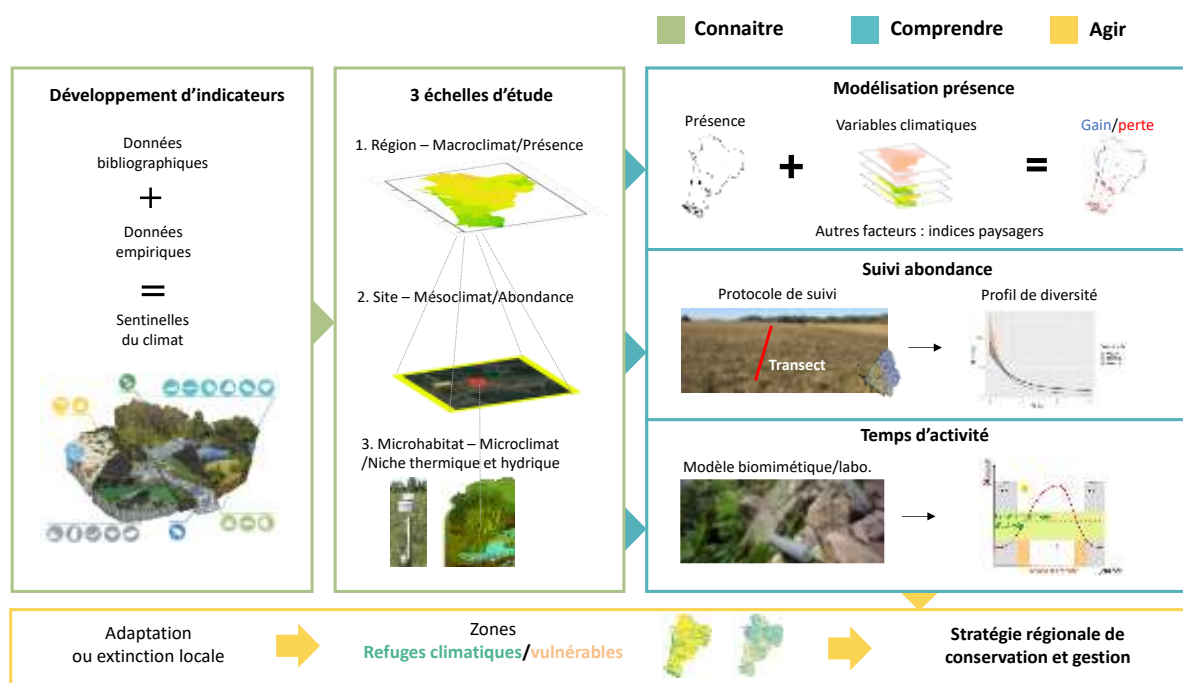


Fig. 3. Démarche de recherche pour la proposition de mesures d'actions de conservation des espèces.

1- La première étape appelée « Connaître » définit des indicateurs biologiques pour mettre en place un réseau de suivi des effets sur la biodiversité locale (Indicateurs, Fig. 3). L'hypothèse de recherche est que les effets locaux peuvent être étudiés à partir de l'état d'indicateurs d'espèces de flore et de faune à capacité de déplacement limitée, « 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 des données d'état pour relier les variables du changement climatique aux données biologiques à l'échelle locale.

Trois réponses spécifiques au changement climatique sont ainsi suivies selon des échelles spatio-temporelles différentes : déplacement des aires de répartition ; changements phénologiques ; modifications d'écophysiologie. Trois échelles d'études sont identifiées (Données, Fig. 3) :

– **Échelle macro-climatique/écologique** (Données, Fig. 3)

À l'échelle régionale, l'observation sur le terrain nécessite des données en quantité suffisante pour obtenir des résultats pertinents. Les observatoires régionaux donnent accès à une masse d'observations naturalistes, validées et diffusées sur tout le territoire. En Nouvelle-Aquitaine, deux dispositifs complémentaires sont la référence et visent à rassembler, gérer, valider et diffuser les informations sur la biodiversité : le Système d'Information sur la Faune sauvage de Nouvelle-Aquitaine (<https://observatoire-fauna.fr/>) et l'Observatoire de la Biodiversité Végétale de Nouvelle-Aquitaine (<https://obv-na.fr/observatoire>). Les données naturalistes ont été principalement récoltées à partir de 1990.

À cette échelle, les données climatiques de Météo France sont utilisées. En France, elles sont disponibles sur la plateforme www.drias.fr. Le modèle choisi est le CNRM 2014 (Aladin 52) qui permet d'accéder aux données climatiques projetées des variables températures, précipitations, humidité, chutes de neige, rayonnement, vent. Les projections retenues sont celles des scénarios : RCP 2.6 (réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)) ; RCP 4.5 (stabilisation des GES), scénario intermédiaire ; RCP 8.5 (fortes émissions des GES). Trois périodes se retrouvent dans ces projections : « Référence ou Présent » (1991 à 2020) ; « Horizon proche » (H1 = 2021–2050) ; « Horizon moyen » (H2 = 2040–2070) ; « Horizon lointain » (H3 = 2071–2100). Ces données sont liées à une résolution de maille de 8kmx8km qui sont redécoupées en mailles de 1kmx1km.

La corrélation entre des données de points de présence observés par pointage GPS et les variables climatiques du même secteur permet d'identifier une probabilité de répartition potentielle de référence au présent et dans le futur des espèces sentinelles du climat. À partir d'un seuil statistique défini de probabilités potentielles de présence, des cartes de gains et pertes sont ensuite créées et permettent d'identifier les secteurs potentiels de zones de refuges climatiques où les espèces pourraient potentiellement trouver des conditions climatiques favorables à leur présence des espèces suivantes (MALLARD, 2021b) : flore et végétations (travaux de recherche du CBNSA), rainettes, Lézard vivipare, vipères (travaux de recherche du CEBC), lépidoptères, odonates, Marmottes des Alpes (travaux de recherche de Cistude Nature), Lézard ocellé, Lézard de Bonnal et Lézard catalan, Grenouille des Pyrénées (thèse de F. Hugon UPPA).

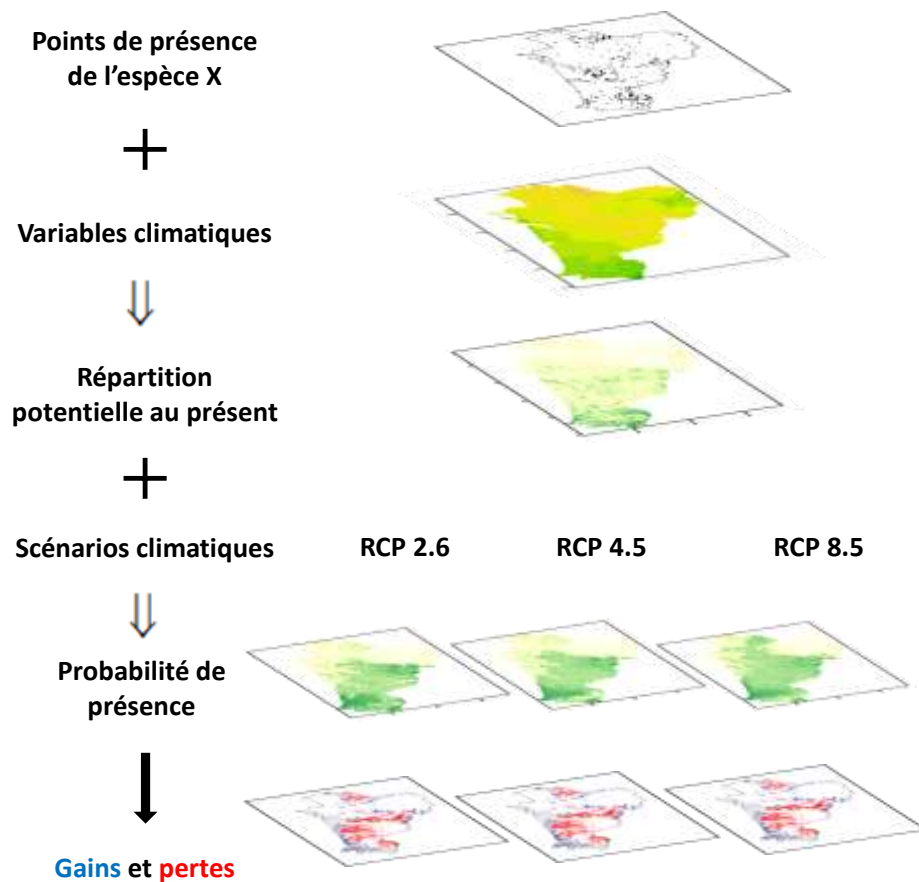


Fig. 4. Étapes de création de cartes de gains/pertes de zones climatiques favorables à la présence des espèces sentinelles du climat.

– **Échelle méso-climatique/écologique** (Données, Fig. 3)

Les données de présences ponctuelles sont accumulables sur une grande surface, à l'échelle de la région. Elles ne sont pas suffisantes pour atteindre une modélisation de l'évolution fine de la réponse des espèces face au changement climatique. Les données d'abondance, de dénombrements des individus plus locales sont plus difficiles à obtenir. La combinaison de ces deux types de données indépendantes enrichit les observations. Cette analyse d'abondance dite « mécanistique » consiste en une démarche sous-jacente de compréhension des processus. Elle nécessite des suivis protocolés des populations à l'échelle méso-écologique sur le long terme.

223 sites ont été choisis selon une répartition spatialement équilibrée à travers la Nouvelle-Aquitaine et selon leur bon état de conservation qui sera maintenu dans le temps (Fig. 5, 0). L'hypothèse est qu'un bon état de conservation stable dans le temps permettra de dissocier les effets du changement climatique des autres facteurs anthropiques sur les réponses de la biodiversité (MALLARD, 2016b ; MALLARD, 2017b). Dans le programme, une première campagne de terrain en 2016 a permis ensuite la mise en place des protocoles de suivis des espèces. Ils ont été validés par le Conseil scientifique du programme. Les protocoles se basent sur des méthodes reconnues au niveau national et adaptées à la problématique du changement climatique (MALLARD, 2021c ; MALLARD, 2021d). De 2016 à 2021, les suivis flore par le CBNSA, le CBNPMP, le CBNMC, sont réalisés une fois dans l'année par site et reconduits sur 3 à 6 ans selon les indicateurs. Les indicateurs faune sont mesurés annuellement par les structures suivantes : Cistude Nature, CEN Nouvelle-Aquitaine, SEL, GMHL, avec selon les indicateurs 2 à 9 suivis par an et par site. Les protocoles des suivis des espèces sentinelles sont complétés par des mesures horaires en continu de la température et de l'humidité de l'air avec un réseau de 184 stations météorologiques (166 stations à 1m10–1m50 du sol et 18 stations à 10–50cm du sol) (MALLARD, 2019) (Annexe 2).

– **Échelle micro-climatique/écologique** (Données, Fig. 3)

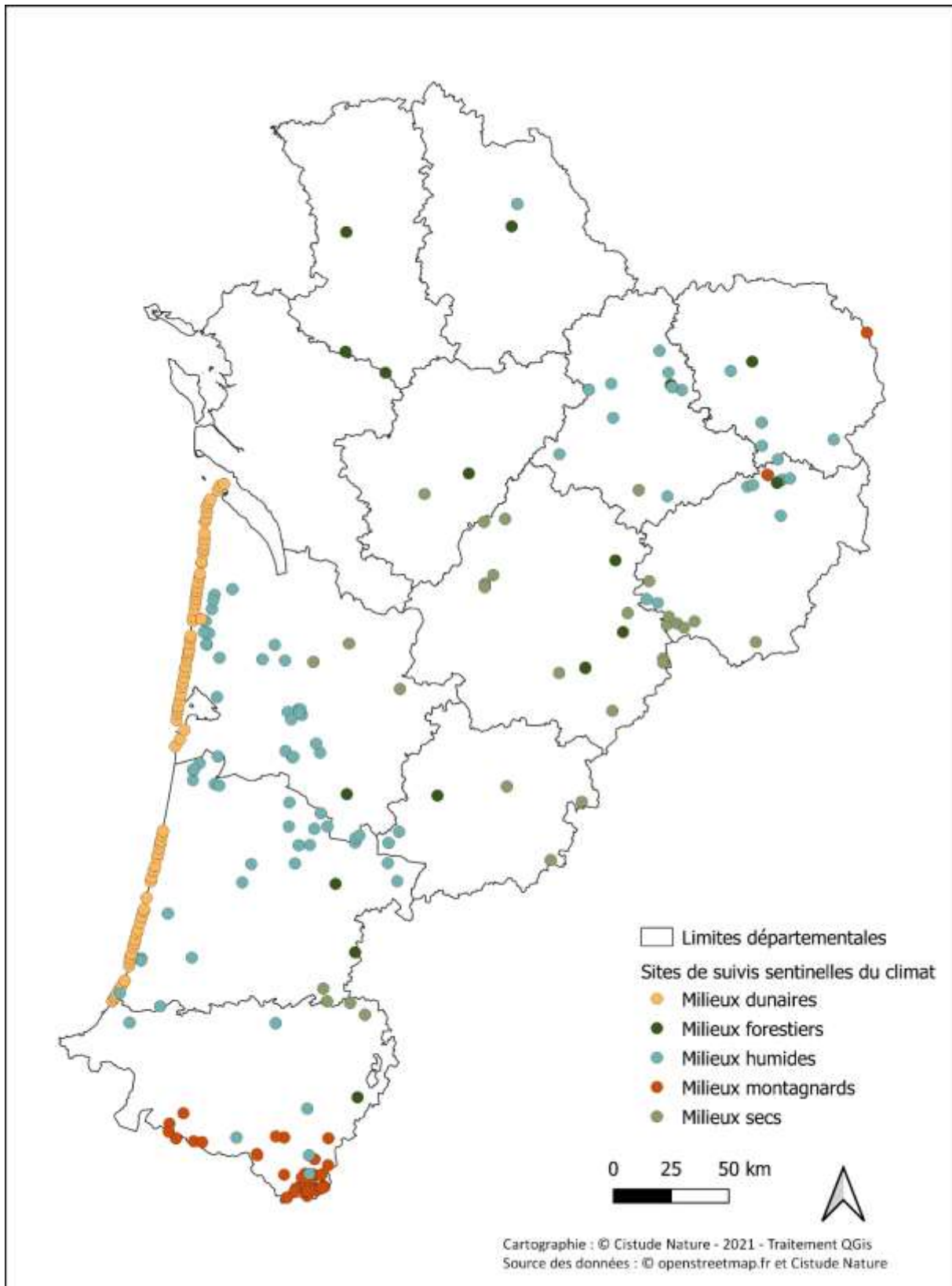
L'écophysiologie contribue à une vision globale des impacts du changement climatique sur les organismes et leurs réponses évolutives. Les stades de développement des espèces ont des plages d'accumulation d'énergie de croissance différentes reflétant une spécialisation en fonction des régimes dynamiques subis de niveaux de température, de l'évolution de l'habitat de protection et les caractéristiques de mode de vie. Leurs limites apparentes de température peuvent être modifiées quelque peu par acclimatation ou plutôt par adaptation évolutive. Les réponses thermocinétiques des individus sont étudiées au moyen de dispositifs expérimentaux sur le terrain (thèse F. Hugon UPPA) en utilisant des thermocouples placés dans des modèles biomimétiques permettant d'imiter les propriétés thermiques des organismes de la Grenouille des Pyrénées, du Lézard de Bonnal et du Lézard catalan (MALLARD, 2019). Certaines espèces sont également étudiées en conditions contrôlées (rainettes, lézards et vipères) afin de clarifier les réponses physiologiques et comportementales aux contraintes thermiques et hydriques (étude en laboratoire du CEBC).

Le changement climatique n'est pas le seul facteur impactant les espèces étudiées. Les données biologiques issues des sites d'étude sont à relier à un contexte paysager, associé à des effets d'autres facteurs anthropiques. Une méthode est de s'appuyer sur des indices paysagers (Données, Fig. 3) permettant de replacer ces écosystèmes observés dans l'espace alentour en étudiant le taux de dégradation environnant et les échanges avec les écosystèmes voisins (MALLARD, 2016a). En effet, dans

une zone donnée les conditions climatiques peuvent être favorables, mais si l'habitat de l'espèce est absent, elle n'y est théoriquement pas présente. En Nouvelle-Aquitaine, les données d'occupation du sol utilisées dans le projet permettant de calculer des indices paysagers proviennent de Corine Land Cover et du Référentiel aquitain d'Occupation du Sol (thèse d'E. Lobry UMR PASSAGES/Cistude Nature).

L'ensemble de ces données permet d'analyser les trois effets spécifiques du changement climatique à savoir la répartition en abondance, la phénologie et l'écophysiologie des espèces sentinelles du climat. À partir de modèles climatiques et écologiques dans le temps et dans l'espace, une modélisation de la répartition des espèces face au changement climatique est réalisée afin de comprendre l'adaptation ou l'extinction locale des espèces dans les années à venir (Modélisation, Fig. 3).

3- Troisième étape « Agir » : les connaissances développées depuis 2016 dans le programme permettent de proposer des premières réflexions de stratégies de conservation dans l'objectif de protéger et prévenir l'extinction locale des espèces et en promouvoir la conservation ou la restauration (Fig. 3).



Sites de suivis sentinelles du climat par type de milieu en 2021

Fig. 5. Sites de suivis des sentinelles du climat validés en 2021.

• *Mobiliser une communauté d'acteurs autour de la donnée et de la modélisation*

La mobilisation d'une communauté rassemble différentes forces motrices intervenant dans la conservation de la biodiversité, ce sont les naturalistes, chercheurs, citoyens et décideurs (Fig. 6).

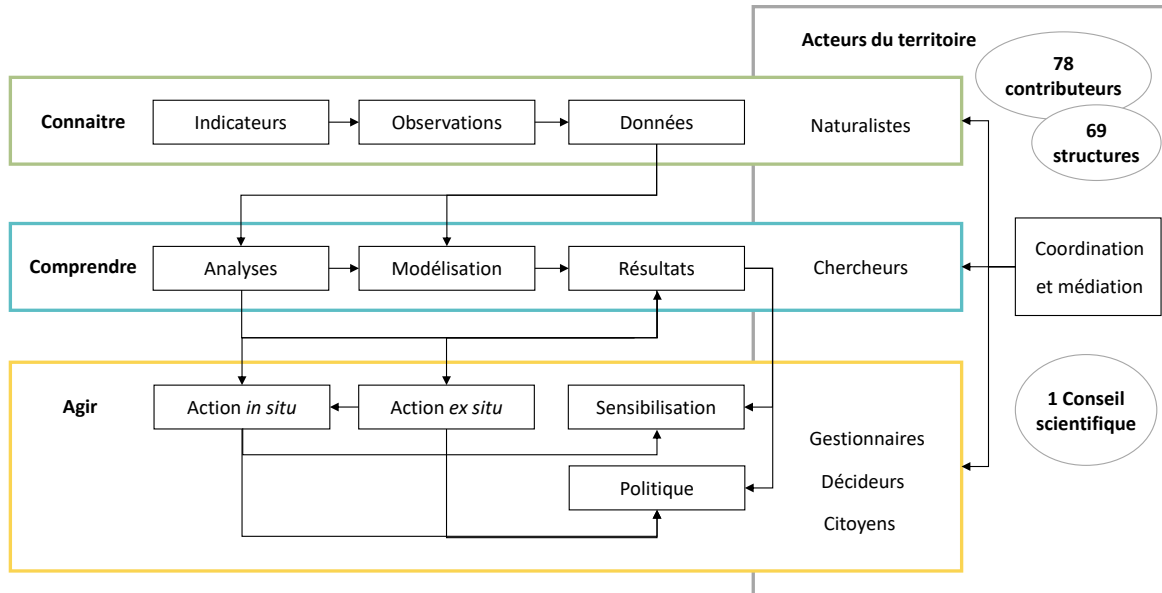


Fig. 6. Mobilisation des acteurs autour d'une démarche de recherche action selon le triptyque « connaître-comprendre-agir ».

Connaître : Les naturalistes font des observations sur des espèces biologiques et relèvent des données météorologiques locales. **Comprendre :** Ces données d'observation sont analysées par les chercheurs dans des modèles paramétrés pour corréliser les variables biologiques de réponse des espèces aux variables caractérisant le changement climatique. **Agir :** Sur la base de ces connaissances, des actions *in situ* et *ex situ*, peuvent être développées appuyées par des démarches de sensibilisation des citoyens à la protection de la biodiversité et intégrées dans les stratégies de politiques locales.

Des obstacles immédiats sont rencontrés lors de l'acquisition et à la centralisation de données brutes pour la mise au format de la modélisation. Selon les espèces, les données recherchées peuvent être partielles, existantes mais hétérogènes. Elles peuvent être centralisées dans différentes bases de données avec différents attributs demandant une harmonisation des champs pour les rassembler. Les données peuvent être récupérées à partir d'observations tierces, non indexées, éparpillées entre différentes organisations. Ces données sont reliées à des métadonnées qui peuvent être à leur tour bien renseignées, hétérogènes ou manquantes. Selon l'échelle d'étude, les données peuvent être précises ou devenir floutées, soumises à des droits.

Les données opportunistes permettent de générer une masse de données importante répartie sur le territoire mais elles sont soumises à de nombreux biais qui ne sont pas repérés lors de l'observation. Ces données sont récoltées par des experts mais aussi par des amateurs liés à des sciences participatives. La validation des données est indispensable avant leur utilisation.

La pression d'observations peut être hétérogène selon le territoire et les espèces. Elle dépend des missions assignées aux structures naturalistes financées, des intérêts naturalistes (les espèces rares sont plus étudiées que les communes) et de la localisation des observateurs avancés et amateurs (observations plus importantes autour des grandes villes et dans les réserves et parcs protégés). Les pistes possibles de corrections sont la mise en place de sciences participatives ciblées pour acquérir

une masse de données importante de présence pour les espèces communes facilement identifiables et des données réparties sur un territoire plus vaste.

Une autre voie est de mettre en place un réseau de suivi scientifique réalisé par des experts pour récolter des données et obtenir une base de données structurée. En France, les naturalistes sont ceux qui récoltent le plus de données sur les espèces et qui ont des compétences de détermination avancées (Fig. 6). Cependant, ces données ne sont pas toujours liées à un protocole scientifique associé et à une analyse mathématique et statistique. L'enjeu est de créer ce lien entre les chercheurs qui réalisent les analyses et les naturalistes (Fig. 6). Dans le programme, des organisations naturalistes (conservatoires et associations) ainsi que des laboratoires de recherche (des Universités et laboratoires de recherche) ont été mobilisés pour la mise en place de protocoles scientifiques (Fig. 6). Leur travail concerne dès le départ la sélection du modèle biologique, les critères de choix des sites, la définition et la localisation des unités d'échantillonnage, les méthodes de comptages, les conditions météorologiques d'observations et autres variables environnementales (exemples caractéristiques du milieu). Une unité d'échantillonnage correspond à une unité de suivi, d'observations, de relevés sur un site, soit en pratique un transect, une placette, un quadrat, un point d'écoute, etc. Cette démarche devient un point de rencontre entre recherche et expertise, entre recherche fondamentale et appliquée, entre ceux qui modélisent et ceux qui expérimentent. La mise en pratique de cette mobilisation doit être associée à un compromis indispensable entre le contexte de terrain et les exigences scientifiques d'un protocole de suivi des espèces à long terme pour obtenir une base de données de qualité. Les consensus dans le programme ont été les suivants : des protocoles simples d'application s'intégrant dans les missions professionnelles des naturalistes, en phase avec la réalité de terrain que connaissent bien les naturalistes, des exigences de rigueur de réalisation du protocole. Des sorties sur le terrain avec les observateurs des mêmes taxons suivis ont été réalisées pour définir les mêmes conditions d'observation.

La base de données est ensuite un élément clé à l'exploitation des données en vue de leurs analyses et de la modélisation. La création d'un gabarit unique est un outil d'homogénéisation de la centralisation des données. En 2018, une forme standard de description des métadonnées et des données brutes a été développée à partir de l'analyse des besoins, du dictionnaire de données et d'un modèle conceptuel de données (MALLARD, 2018b). Cette réflexion de gabarit est basée sur le Système d'Information sur la Nature et les Paysages (SINP) déclinée au niveau régional par l'Observatoire Aquitain de la Faune Sauvage (OAFS) et sur le référentiel taxonomique national pour la faune, la flore et la fonge de France métropolitaine et d'outre-mer (TaxRef). Depuis 2021, des modules de saisie des données protocolées du programme sont en cours de développement sur Geonature un outil open source développé par les parcs nationaux français. L'objectif à terme est de centraliser et informatiser toutes les données des suivis sentinelles du climat. Une base de métadonnées via des fiches de terrain complète le dispositif et permet de localiser précisément les unités d'échantillonnage (MALLARD, 2021c ; MALLARD, 2018b).

Les données environnementales sont également indispensables à acquérir pour étudier les effets des pressions dont celui du changement climatique sur les espèces sentinelles du climat, c'est-à-dire des données climatiques, géophysiques, physico-chimiques et les données d'occupation du sol. Ces différentes sources sont liées à des résolutions différentes et peuvent être adaptées pour modéliser l'ensemble des données à la même résolution.

La diffusion des informations induit la prise de conscience des acteurs qui sera d'autant plus importante que les travaux de recherche seront diffusés à différents niveaux qui s'imbriquent. Le programme propose des outils à destination de tous les publics. Ces outils permettent de montrer la science en construction et de faire comprendre l'idée que les résultats de la modélisation ne sont pas

une vérité. Ils sont tributaires du niveau des connaissances actuelles, des hypothèses posées, des données partielles existantes, des modèles choisis, des outils utilisés avec leur limites et renferment leurs incertitudes.

Les forces motrices, les décideurs, sont des acteurs de la mise en place des actions de conservation des espèces (Fig. 6). En France, la décentralisation consiste en un transfert de pouvoirs de décision de l'État à différentes entités liées à une échelle infranationale comme la région. Elle est ainsi une échelle pertinente pour l'action. Les financeurs du présent programme sont des acteurs dans la conservation à plusieurs échelles : l'Union Européenne, la Région Nouvelle-Aquitaine, le Département de la Gironde et le Département des Pyrénées-Atlantiques. L'objectif du programme est d'apporter les connaissances via des outils d'aide à la décision. Dans le programme, des réunions annuelles avec les décideurs présentent l'avancée du travail. L'efficacité, la diffusion de l'information réside dans la présentation d'exemples concrets de résultats sur le territoire. La science éclaire, accompagne et montre le chemin mais n'est pas décisionnelle. Les décideurs sont les garants du bien commun et de l'intérêt général. Avec cette connaissance, ces forces motrices peuvent impulser une démarche politique d'initiatives et d'expérimentations d'adaptation au changement climatique dans une démarche de transversalité du territoire.

Enfin, l'acteur central est le coordinateur (Fig. 6). Il se situe à l'interface entre la science et la société, reliant les décideurs, les citoyens, les experts naturalistes et les chercheurs. Le coordinateur guide les missions et affiche les priorités scientifiques et naturalistes. Il permet le développement d'un langage commun entre les acteurs. Il garantit la démarche scientifique et l'avancée technique du programme en mobilisant la communauté. Une démarche hypothético-déductive (combinaison de l'approche empirico-inductive « bottom-up » et déductive « top-down ») relie les études de terrain, les modèles et les expériences afin de valider des relations causales entre le changement climatique et les dynamiques de la biodiversité. L'objectif principal est de garantir l'intérêt général qui est l'objectif de la conservation de la biodiversité. Dans le programme, le coordinateur est « Cistude Nature » une association selon la loi 1901 agréée protection de la nature. Cet objectif correspond directement à l'essence même d'une association de protection de la nature.

• *Structure de l'ouvrage*

Dans le cadre de cette démarche de recherche en écologie et biologie de la conservation, cet ouvrage scientifique présente par groupe taxonomique (Partie I. La flore, Partie II. Les insectes, Partie III. Les amphibiens, Partie IV. Les reptiles, Partie V. Les mammifères, Fig. 7) les espèces sentinelles du climat sensibles au changement climatique.

Chaque chapitre est associé à des indicateurs biologiques de milieux et habitats spécifiques :

- 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 (Chapitre 1 et 2)

- les lépidoptères des pelouses sèches, de landes humides et des pelouses de montagne (Chapitre 3), une étude spécifique sur la phénologie de *Phengaris alcon* écotype « *alcon* » (Denis & Schiffermüller, 1775) - Azuré des mouillères des landes et prairies humides tourbeuses à paratourbeuses (Chapitre 4)

- Leucorrhines et cortège d'odonates associé des lagunes des Landes de Gascogne (Chapitre 5)

- *Gomphocerus sibiricus* (Linnaeus, 1767) et le cortège des orthoptères associé des prairies et pelouses de montagne (Chapitre 6)
- *Hyla molleri* (Bedriaga, 1889) – Rainette ibérique des lagunes du triangle landais et *Hyla arborea* (Linnaeus, 1758) – Rainette verte des mares des landes et du bocage Picto-limousin (Chapitre 7)
- *Rana pyrenaica* (Serra-Cobo, 1993) – Grenouille des Pyrénées des torrents de montagne (Chapitre 8)
- *Timon lepidus* (Daudin, 1802) – Lézard ocellé des dunes grises du littoral aquitain (Chapitre 9)
- *Zootoca vivipara* (Lichtenstein, 1823) – Lézard vivipare des landes humides et tourbières de Nouvelle-Aquitaine (Chapitre 10)
- *Iberolacerta bonnali* (Lantz, 1927) – Lézard de Bonnal et les lézards gris des affleurements et éboulis rocheux de montagne (Chapitre 11)
- *Vipera berus* (Linnaeus, 1758) – Vipère péliade et les vipères des landes humides d'altitude (Chapitre 12)
- *Marmota marmota* (Linnaeus, 1758) – Marmotte des Alpes des pelouses et rocailles pyrénéennes (Chapitre 13)

Les chapitres sont constitués des parties suivantes :

- §.1) en introduction, le contexte et la problématique liés aux espèces étudiées,
- §.2) le matériel et les méthodes mis en place dans le cadre de la modélisation corrélative de la répartition des espèces (échelle macroclimatique et écologique) concernant les suivis naturalistes des espèces et du réseau de stations météorologiques sur des sites d'études (échelle mésoclimatique et écologique), l'identification des niches thermiques et/ou hydriques des espèces (échelle microclimatique et écologique),
- §.3) les résultats de 2017 à 2021 sur les cartes de répartition des espèces face au changement climatique et les variations interannuelles des espèces en lien avec le climat,
- §.4) une discussion permettant d'aboutir à des pistes d'hypothèses pour les trois effets spécifiques du changement climatique sur la répartition, la phénologie et l'écophysiologie des espèces sentinelles du climat.

À travers le développement de connaissances de 2016 à 2021, des premières pistes de réflexions d'actions sont proposées suivant le concept de la Biologie de conservation appliquée.

Enfin la dernière partie (Partie VI. Le paysage) présente l'originalité du programme, à savoir d'intégrer dans la modélisation de répartition des espèces sentinelles du climat d'autres facteurs à travers les indices paysagers, cela dans l'hypothèse de pouvoir dissocier la part du changement climatique des autres facteurs dans la réponse de ces espèces.

