



les sentinelles du climat



Proposition d'indicateurs biologiques et
préfiguration des protocoles de suivis en
Normandie

Barrioz M., Buchet J., Cantat O., Carpentier C., Chéreau L., Douville
C., Etienne S., Gresselin F., Lebrun J., Simon A., Thomas I., Valy N.,
Waymel J., Zambettakis C., Mallard F. 2022

Avec le soutien financier en 2022 de l'Office Français de la Biodiversité





Les sentinelles du climat



Proposition d'indicateurs biologiques et préfiguration des protocoles de suivis en Normandie

Barrioz M., Buchet J., Cantat O., Carpentier C., Chéreau L., Douville C., Etienne S., Gresselin F., Lebrun J., Simon A., Thomas I., Valy N., Waymel J., Zambettakis C., Mallard F. 2022 – *Les sentinelles du climat : proposition d'indicateurs biologiques et préfiguration des protocoles de suivis en Normandie*. URCPiE de Normandie (coord.). 30 p.

Contact du coordinateur du programme « les Sentinelles du climat » en Normandie :
mickael.barrioz@cpiecotentin.com

Sommaire

Liste des abréviations.....	6
Introduction.....	7
1. Présentation générale du programme « les sentinelles du climat ».....	8
1.1. Fondements scientifiques : les indicateurs biologiques	8
1.2. Origine et but.....	8
1.3. Organisation normande	11
2. Mise en place des suivis protocolés en Normandie (2021–2024).....	14
2.1. Choix des espèces.....	14
2.1.1. Végétations.....	14
2.1.2. Flore	15
2.1.3. Faune ectotherme.....	16
2.1.4. Liste des espèces sentinelles élaborée en 2021–2022	19
2.2. Choix des protocoles et des stations météorologiques (mésoclimat).....	22
2.3. Choix des sites.....	25
Conclusion.....	26
Bibliographie	27

Liste des abréviations

CBN : Conservatoire botanique national

CEFE : Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive

CEN : Conservatoire d'espaces naturels

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (par extension Groupe d'experts sur l'évolution du climat lorsqu'il est associé à une région) / IPCC-*Intergovernmental Panel on Climate Change*

GRETIA : Groupe d'étude des invertébrés armoricains

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

IPBES : *Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* / Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (« GIEC de la biodiversité »)

MNHN : Muséum national d'Histoire naturelle

OBHeN : Observatoire Batracho-Herpétologique Normand

OFB : Office Français de la Biodiversité

SHF : Société Herpétologique de France

URCPIE : Union Régionale des Centres Permanents d'Initiatives Pour l'Environnement

Introduction

Au cours des dernières 500 millions d'années, la vie sur Terre a presque totalement disparu à cinq reprises, à cause de changements climatiques. Ces événements sont appelés extinctions massives. Aujourd'hui aux portes de la sixième extinction de masse, le taux d'extinction des espèces pourrait être au moins 100 fois plus élevé que lors des précédentes extinctions massives selon les spécialistes (Pimm *et al.* 2014). Et, le changement climatique est selon l'IPBES (2019), l'un des trois facteurs principaux de déclin, avec la destruction des milieux naturels et la surexploitation des espèces.

Le rôle des activités humaines dans cette crise climatique sans précédent est avéré (Ceballos *et al.* 2015). Malheureusement, les conséquences précises de ce changement climatique sont encore assez méconnues, notamment leurs effets sur la biodiversité. Il devient donc urgent de suivre les impacts du changement climatique actuel sur les espèces les plus vulnérables afin d'anticiper des mesures de gestion adaptées.

L'ampleur des conséquences est en cours d'évaluation à l'échelle nationale et, à l'échelle régionale, un GIEC Normand s'est constitué fin 2019. À l'issue des travaux publiés (Cantat *et al.* 2022, Langlois *et al.* 2022) et de leurs réactualisations en cours d'après les dernières simulations disponibles, on constate depuis ces 40 dernières années, une augmentation des températures et du nombre de jours de fortes chaleurs ainsi qu'une diminution du nombre de jours de gel sur le territoire normand. Depuis la seconde moitié des années 1980, la température atmosphérique moyenne s'est élevée de +0,7°C. Et, les projections sur l'horizon 2100 indiquent une hausse de +1°C à + 3,5°C. Selon le scénario pessimiste, on assisterait à une augmentation importante de la fréquence des jours de chaleur supérieure ou égale à 25°C ; d'environ 15 jours par an actuellement à près de 50 jours par an à la fin du siècle. De plus, les secteurs les plus éloignés de la Manche enregistreraient de l'ordre de 60 à 90 jours de chaleur par an à la fin de ce siècle, soit des valeurs se rapprochant de celles observées actuellement sur les pourtours du domaine méditerranéen. Les 30°C (qui sont actuellement très peu fréquents dans la région), deviendraient communs en été dans l'intérieur des terres (30 à 40 jours par an). Dans le même temps l'évolution des cumuls annuels de précipitations, tendrait vers une augmentation de l'ordre de 8 %, valeur masquant toutefois de fortes différences entre les saisons, avec notamment un hiver beaucoup plus arrosé (+20 %) et un été nettement plus sec (-16 %). Une élévation du niveau de la mer est également constatée (+ 20 cm en moins de 100 ans, plus d'un mètre d'ici 2100) avec les conséquences induites : érosion du littoral (*hot spot* de biodiversité), submersion, salinisation des eaux douces... En outre, la température des cours d'eau normands est orientée à la hausse, d'environ de 0.1 °C par an. Il en est de même pour la température de la mer de la Manche (+0.07 °C par an en surface). Le pH de cette dernière est orienté à la baisse (-0,26 unité pH en un peu plus de 10 ans à la station Somlit de Luc-sur-Mer, Calvados).

Tous ces changements ont un impact sur les espèces en modifiant leur écosystème et/ou leur physiologie (et par conséquent, leur capacité à se nourrir, à se reproduire, à coloniser de nouveaux sites, etc...). Les conditions écologiques et/ou biologiques des espèces se voient alors modifiées et cela peut influencer sur leurs répartitions mais aussi sur l'abondance des populations. Ainsi, des extinctions locales pourraient être observées.

1. Présentation générale du programme « les sentinelles du climat »

1.1. Fondements scientifiques : les indicateurs biologiques

Un des postulats de recherche est que les effets du changement climatique sur la biodiversité peuvent être étudiés à partir d'indicateurs, utilisant des espèces ou groupes d'espèces connus pour :

- être sensibles au changement climatique (« climato-sensibles »),
- être en régression,
- avoir des capacités de dispersion faibles¹.

Ces espèces, dites « sentinelles », sont ou devraient être les premières à subir les variations climatiques locales (Mallard 2016a, Mallard & Couderchet 2019). Pour la flore et les invertébrés, dont la diversité des peuplements est forte, le suivi à l'échelle de la communauté d'espèces sera privilégié.

1.2. Origine et but

Ce projet innovant pour la Normandie est une déclinaison du programme *les sentinelles du climat* fondé par Cistude Nature en Nouvelle Aquitaine (Mallard 2016a, Mallard & Couderchet 2019), et en cours de développement dans d'autres régions (Occitanie, Bretagne, Auvergne-Rhône-Alpes...). Le but du programme est d'étudier l'impact du changement climatique sur la biodiversité locale par le suivi d'espèces indicatrices appelées « sentinelles du climat » particulièrement vulnérables. La finalité de cette étude à terme est d'anticiper une gestion locale adaptée, selon le triptyque « connaître, comprendre, agir ». Par exemple, selon les secteurs : en favorisant une gestion des boisements qui limite dans certains cas les pertes hydriques, avec une gestion adaptée des « mares »... mais aussi en prenant en compte

¹ Pour les invertébrés, Chereau *et al* 2022, proposent pour la déclinaison normande de prendre en compte les espèces dont les adultes sont aptères ou brachyptères et/ou dont les adultes ont une capacité estimée d'ordre centimétrique à métrique et/ou celles réputées comme fidèles à leur lieu de vie.

les modélisations afin de mettre l'accent sur les secteurs qui pourraient être les plus favorables à l'avenir.

Cependant ces mesures d'urgence ne doivent pas se substituer à un renforcement global des écosystèmes en termes de fonctionnalité afin de préserver le potentiel adaptatif des organismes mais aussi atténuer les effets du changement climatique. Selon le GIEC & l'IPBES (Pörtner *et al.* 2021) la protection et la restauration des écosystèmes riches en carbone (milieux boisés, zones humides...) constituent la priorité absolue dans une perspective conjointe d'atténuation du changement climatique et de protection de la biodiversité.

Le principe du programme est d'établir un suivi des espèces et des conditions climatiques locales. L'analyse ensuite des données croisées permet d'obtenir les réponses des espèces au changement climatique actuel et futur en lien avec les prévisions du GIEC.

Les analyses de données peuvent être effectuées à trois échelles complémentaires :

- Analyse des données de présence des observatoires régionaux (Conservatoire botanique, GRETIA, OBHeN/URCPIE de Normandie) et des données Météo France pour une vision à l'échelle régionale (macroclimat).
- Analyse des données protocolées des espèces sentinelles et des données des stations météorologiques de chaque site pour une vision à l'échelle locale (mésoclimat).
- Une dernière analyse est possible selon les questionnements scientifiques à l'échelle micro, à l'aide de sondes représentant l'individu (microclimat).

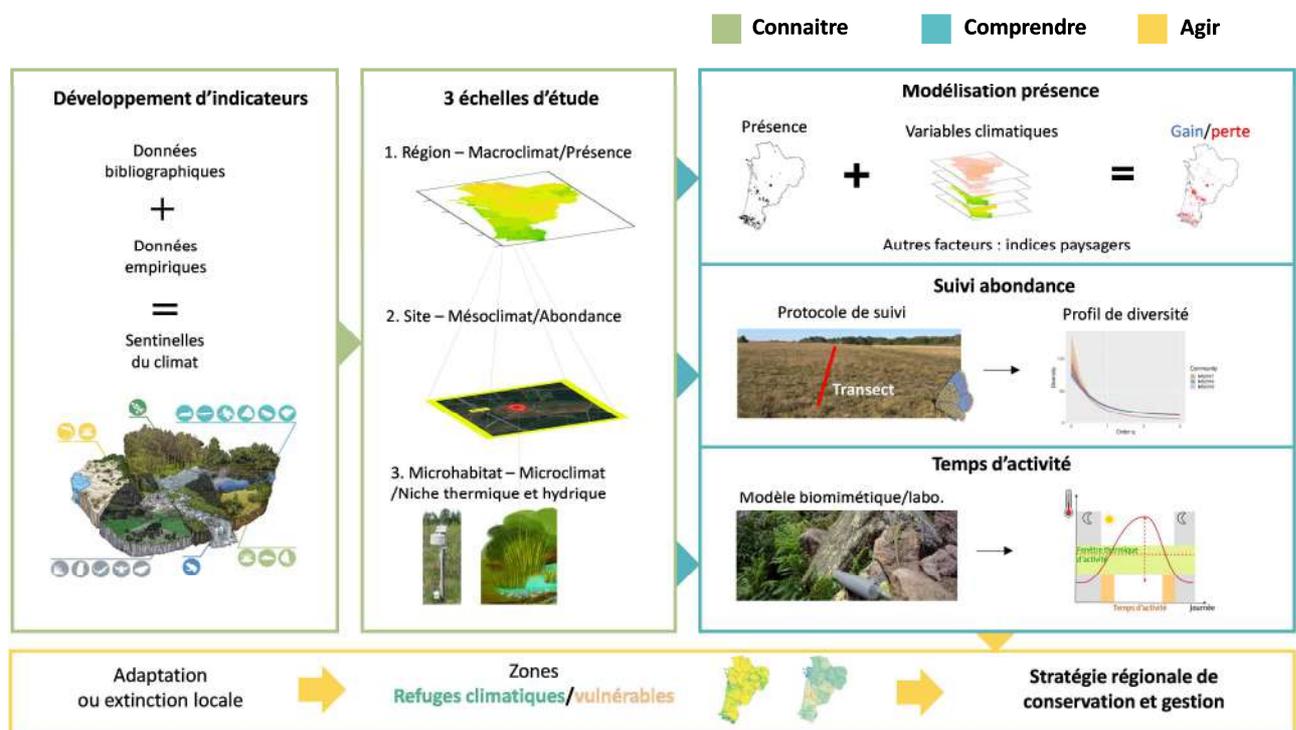


Figure 1 : Démarche de recherche pour la proposition de mesures d'actions de conservation des espèces (Mallard 2021).

À l'échelle de la région, sur la base des données des observatoires et à partir d'un seuil statistique défini de probabilités potentielles de présence, des cartes de gains et pertes peuvent être créées et permettre d'identifier les secteurs potentiels de zones de refuges climatiques où les espèces pourraient potentiellement trouver des conditions favorables à l'avenir.

À l'échelle des sites suivis, l'évolution de la diversité spécifique croisée aux données météorologiques peuvent permettre de préciser la vulnérabilité des espèces (dynamique des populations) ou des communautés (dans le cas d'une approche phytocénotique par exemple) et les paramètres météorologiques les plus prégnants. Une attention particulière peut être portée sur la phénologie des espèces, notamment dans le cas de relations « plantes-insectes » fortes ; par exemple, l'Azurée des mouillères (*Phengaris alcon*) et sa plante-hôte, la Gentiane pneumonanthe (*Gentiana pneumonanthe*).

L'échelle locale, quant à elle, peut permettre d'identifier la niche thermique et hydrique des espèces qui pourraient se maintenir en fonction des microhabitats présents dans des secteurs *a priori* défavorables au regard des analyses macroclimatiques.

En outre, la mise en place d'indices paysagers permettant de décrire les processus écologiques à l'œuvre, parallèlement aux effets du changement climatique, sur les sites de suivi du programme est également possible et complémentaire. A titre d'exemple, Cistude Nature a intégré la prise en compte des éléments paysagers dans la modélisation des répartitions des espèces sentinelles du climat (Lobry *et al.* 2018).

La déclinaison normande du programme est co-portée par Cistude Nature (initiateur du programme initial en Nouvelle Aquitaine) et l'URCPIE de Normandie (initiateur de la déclinaison régionale).

A la source du projet, Cistude Nature s'est appuyé sur un conseil scientifique interrégional composé de 8 membres, afin de valider les fondements scientifiques (cf. 1.1.) :

- Hervé Le Treut, Président d'honneur
- Inge Van Halder, INRAE / Université de Bordeaux, UMR Biodiversité Gènes et Ecosystèmes
- Olivier Lorvelec, INRAE / Université de Rennes, UMR Ecologie et Santé des Ecosystèmes
- Claude Miaud, CNRS Montpellier, CEFE
- Sylvain Delzon, INRAE / Université de Bordeaux, UMR Biodiversité Gènes et Ecosystèmes
- Yohana Cabaret, AcclimaTerra
- Benoît Sautour, Professeur – Université Bordeaux – UMR EPOC, Station Marine
- Cécile Gautier, Responsable du Service Climatologie du Sud-Ouest, Météo-France

Un des points importants du programme est l'interdisciplinarité : climatologie, hydrologie, biogéographie et écologie du paysage, phytosociologie, biologie, biostatistique, diverses

spécialités naturalistes (botanique, entomologie, herpétologie...), avec une double approche de terrain (en lien avec la biologie de la conservation) et de laboratoire.

Les informations produites dans le cadre du programme doivent être partagées avec le plus grand nombre de citoyens, et notamment avec les représentants du peuple (appelés parfois les « décideurs »). Il s'agit d'accompagner une prise de conscience collective et de proposer des outils d'aide à la décision, tout en montrant la « science en construction » qui traduit notamment l'idée que le résultat des modélisations reste un outil et non une vérité absolue. Il dépend du niveau des connaissances actuelles, des hypothèses posées, des modèles choisis... avec toutes leurs limites.

Enfin, le programme *les sentinelles du climat* vise aussi à promouvoir les sciences participatives (ou sciences citoyennes) notamment dans le cadre de l'observatoire des saisons porté par le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE-CNRS) et Tela Botanica.

1.3. Organisation normande

L'URCPIE propose une co-construction de cette déclinaison du programme avec les structures naturalistes et de recherche de Normandie. Des représentants de ces structures font partie du conseil scientifique régional (CS), dont les missions sont : élaborer la liste des espèces sentinelles du climat et les protocoles associés, valider l'échantillonnage des sites et participer aux analyses ainsi qu'aux propositions opérationnelles.

Les membres du CS identifiés en 2022 :

- Mickaël Barrioz, URCPIE de Normandie et OBHeN
- Julien Buchet, CBN Bailleul
- Olivier Cantat, Université de Caen et GIEC Normand
- Cécile Carpentier, CPIE du Cotentin
- Loïc Chéreau, GRECIA et GIEC Normand
- Carine Douville, ANBDD
- Sébastien Etienne, ONF
- Frédéric Gresselin, DREAL et GIEC Normand
- Jérémy Lebrun, CEN de Normandie
- Adrien Simon, CEN de Normandie
- Luna Thomas, ANBDD
- Nicolas Valy, CBN Bailleul
- Juliette Waymel, CBN Brest
- Catherine Zambettakis, CBN Brest

Après des premiers échanges effectués en 2022, Servane Lemauiel-Lavenant et/ou Sylvain Diquélou (Université de Caen) ainsi qu'Estelle Langlois et/ou Estelle Forey (Université de Rouen) pourraient renforcer le CS notamment dans les domaines flore - habitats - fonctionnement des écosystèmes.

D'autres personnes peuvent évidemment participer à ce groupe de travail, en fonction des questionnements en cours. Par exemple, en 2022, quatre collègues naturalistes ont participé à l'élaboration des listes d'espèces en apportant leur expertise spécifique concernant l'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon*), la Mulette perlière (*Margaritifera margaritifera*) et l'Écrevisse à pattes blanches (*Austropotamobius pallipes*) : respectivement, Nathalie Simon (CPIE du Cotentin), Julie Thivol et Mélissande Gautier (CPIE des Collines normandes) ainsi que Laurent Rousseau (CPIE des Collines normandes).

Les sites suivis seront choisis avec les organismes gestionnaires d'espaces naturels tels que le Conservatoire d'Espaces Naturels, l'Office National des Forêts, les services ENS des départements, les Réserves Naturelles, les structures en charge des terrains du Conservatoire du littoral, etc. mais aussi des collectivités locales qui pourront dans certains cas également assurer le suivi des espèces sur leurs sites. Il s'agit de mobiliser chacun au plus près du territoire, en proposant un accompagnement technique. Par exemple, ce programme a déjà été présenté en 2021-2022 à certaines collectivités dans le cadre d'un appui à la planification et/ou pour une formation technique des acteurs : pour le plan d'actions de Métropole Rouen Normandie, la Stratégie Nature et Biodiversité du Havre Métropole, la mise en place d'indicateurs Biodiversité de Seine Eure Agglo, le PNR des Boucles de la Seine Normande...

Un comité de pilotage (COFIL) composé des financeurs, des gestionnaires et du CS pourraient se réunir une fois par an, en automne/hiver ou en se greffant à des événements existants (forum des gestionnaires, journées organisées par l'ANBDD...).

Des actions de conservation pourraient être proposées lors d'échanges entre les membres du CS et les gestionnaires, au fur et à mesure de l'acquisition de connaissances naturalistes, écologiques et climatiques.

Les années 2021-2024 devraient permettre de mettre en place le programme à l'échelle régionale (choix et tests de suivis des espèces sentinelles et des communautés d'espèces, des stations météorologiques, des protocoles, des sites suivis...), et 2025-2026 devraient marquer le début des suivis de l'ensemble des espèces ou communautés finalement retenues (tab. I).

Évidemment, certains résultats pourraient être présentés dès 2023-2026, notamment ceux en lien avec les BDD des observatoires thématiques mais, au regard des objectifs, ce programme devra s'inscrire dans la durée et donc se prolonger après 2026.

Années	A l'échelle régionale	A l'échelle des sites protégés	A l'échelle des micro-habitats
	Analyse des BDD des observatoires thématiques	Analyse des suivis spécifiques	Analyse des suivis spécifiques
	Macroclimat	Mésoclimat (topoclimat)	Microclimat
2021–2022	Constitution d'un Conseil scientifique normand (CS), présentation des tenants et aboutissants aux gestionnaires d'espaces naturels, ainsi qu'aux partenaires techniques et financiers.		
	Premières réflexions relatives aux jeux de données régionaux (évolution des aires de répartition, décalages phénologiques...).	Proposition d'une liste d'espèces sentinelles par le CS, propositions d'espèces supplémentaires par les gestionnaires et autres partenaires.	
		1 ^{ères} réflexions et tests de protocoles de suivi.	
		Lancement de l'échantillonnage des sites avec les gestionnaires d'espaces naturels.	
2023–2024	Renforcement des BDD (comblement des lacunes : secteurs sous-prospectés, actualisation des données...).	Mise en place de l'échantillonnage des sites.	
	Tests de cartes croisant la répartition des espèces et les conditions climatiques (cartes de répartition potentielle, de pertes et de gains...).	Réflexions et tests des protocoles.	1 ^{ères} réflexions relatives aux suivis microclimatiques notamment en lien avec les expériences menées dans les autres régions.
	Recherches sur les éventuels décalages phénologiques observés.	Choix et mise en place des stations météorologiques.	
		Accompagnement des gestionnaires sur les sites retenus (présentation des protocoles, sélections des transects ou quadrats...)...	
		Début des suivis dès que les protocoles sont fixés (selon les groupes taxinomiques).	
2025–2026	Bilan et capitalisation de la première phase (2021–2026).	Suivis des espèces sentinelles.	Mise en place des suivis microclimatiques.

Tableau I : Étapes de travail du programme entre 2021 et 2026

2. Mise en place des suivis protocolés en Normandie (2021–2024)

Pour rappel, le programme *les sentinelles du climat* propose de réfléchir à l'analyse des données d'occurrence des observatoires régionaux et des données climatiques de Météo France pour une vision à l'échelle régionale (macroclimat). Cette échelle semble être pertinente pour réaliser des travaux de modélisation visant à prédire l'évolution de l'aire de répartition des espèces et de certaines végétations.

Mais ce niveau d'analyse est complété par la mise en place de suivis protocolés sur différents grands types de milieux identifiés (mésoclimat) : les **zones humides** (landes humides, tourbières, marais, fonds de vallées/terrasses, sources/bassins versants...), le **littoral** (dunes, marais arrière littoraux, falaises...), les **milieux secs** (pelouses calcicoles, éboulis, landes sèches...) et les **milieux forestiers** (hêtraies/chênaies atlantiques, bois alluviaux...).

D'autres types de milieux pourront être intégrés lors de la mise en place du programme, au fur et à mesure des échanges au sein du conseil scientifique et avec d'autres partenaires. Valy & Zambettakis (CBN de Bailleul et de Brest) proposent par exemple de réfléchir au milieu urbain via des suivis des communautés lichéniques ou Servane Lemauviel-Lavenant (Université de Caen) aux prairies via des indicateurs fonctionnels (e.g. autour de la floraison).

2.1. Choix des espèces

2.1.1. Végétations

Les espèces végétales sont constitutives (en milieu terrestre) des habitats naturels ou semis naturels et intégratives de l'ensemble des caractéristiques pédoclimatiques de celui-ci. Les évolutions du milieu ont un impact sur elles mais de manière plus marquée sur la composition de leurs communautés.

Ainsi en termes de flore, la plupart des travaux et études réalisées sur le changement climatique concerne les communautés végétales et au sein de ces communautés l'analyse diachronique de la répartition des espèces en fonction de leur autoécologie, écophysiologie. C'est le cas notamment de la récente étude publiée dans le cadre du réseau Vigieflore par le CNRS et le MNHN – *Modification des communautés végétales en contexte de changement global, Apports des jeux de données nationaux pour caractériser les effets du changement climatique et des interactions plantes-pollinisateurs* (Martin, 2018).

D'autres programmes sont orientés sur des milieux spécifiques qui d'après modélisation seront parmi les écosystèmes risquant de rencontrer les plus grandes modifications d'aires de répartition des végétaux (Nogues-Bravo *et al.*, 2007) notamment les milieux forestiers méditerranéens par le CEFÉ-CNRS ou les milieux montagnards par le biais de plusieurs programmes tels que :

- Le programme transfrontalier FLORAPYR, animé par le Conservatoire botanique national des Pyrénées et de Midi-Pyrénées
- Le projet FloreClim animé par le CBN alpin pour évaluer l'impact du changement climatique en s'appuyant sur 2 objets « modèles » de la flore alpine d'intérêt communautaire en croisant des données biologiques et des données climatiques et géomorphologiques : les combes à neiges et une espèce le Trèfle de rochers. Ce programme vise à proposer des scénarii de réaction du trèfle et des combes à neige au changement climatique et d'optimiser les stratégies de conservation et de gestion intégrant ces scénarii notamment pour anticiper les effets du changement climatique

Les milieux de plaines et même le littoral et les espèces botaniques afférentes sont donc peu étudiés en termes d'impact du changement climatique sachant que pour le littoral les conséquences sur le niveau marin auront certainement en Normandie une incidence bien plus importante sur les végétations non halophiles que les aspects d'évolution strictement climatique.

2.1.2. Flore

L'optimum pour appréhender les espèces réellement impactées par le changement climatique serait de saisir via les observatoires de la flore (CBN) l'évolution des aires de répartition sur le territoire métropolitain de plusieurs groupes de taxons réputés climato-sensibles et caractéristiques/typiques, de milieux naturels représentatifs à haute valeur patrimoniale : prairie, forêt, zones humides, montagnes, littoral.

Afin de répondre cependant au mieux à la notion d'espèces sentinelles du climat c'est-à-dire de choisir des espèces ou des communautés végétales en régression et/ou menacées dont on suppose que le facteur climatique est responsable de cet état, nous proposons de retenir les critères suivants :

- Espèces ou communautés végétales des tourbières et milieux tourbeux pouvant être impactés par les forts écarts à la moyenne des températures estivales ou/et à des périodes prolongées d'assèchements
- Espèce littorales soumises directement aux évolutions du trait de côte et à l'étranglement côtier notamment en milieu dunaire ou pré salé
- Espèces caractéristiques des milieux hyperatlantiques du massif armoricain à pluviométrie régulière, forte hygrométrie permanente pouvant être impactés par les

forts écarts à la moyenne des températures estivales ou/et à des périodes prolongées d'assèchements ou à caractère montagnard.

- Espèces intervenants de manière très spécifique dans le cycle de vie d'une entomofaune pouvant être impactée par le changement climatique
- Espèces circumboréales en limite d'aire de répartition
- Espèces de listes rouges présentant une majorité des stations en sites protégés permettant une participation des gestionnaires au programme

Le suivi des végétations accueillant ces espèces devrait être ajouté afin d'enrichir les capacités d'analyse des résultats.

Par ailleurs le développement en cours d'un Plan régional d'action en faveur des tourbières à l'initiative du CEN et des CBN peut fournir un support de réflexion pour la mise en place d'un volet « végétation » au programme Les sentinelles du climat pour ces milieux a priori climato-sensibles bien que d'autres facteurs interviennent, notamment la gestion de la ressource en eau.

2.1.3. Faune ectotherme

De nombreux naturalistes, experts et chercheurs, ont mis en évidence la prévalence des facteurs climatiques sur la répartition des **amphibiens** et des **reptiles**, et leur sensibilité au changement climatique (Araújo *et al.*, 2006, Steigerwald 2021). Cependant, l'impact de ce changement sur les paramètres démographiques varie considérablement entre les espèces ainsi qu'entre les populations d'une même espèce, notamment en fonction de leur situation au sein de l'aire de répartition (Muths *et al.* 2017). En Normandie, il semblerait que globalement les espèces d'affinité septentrionales/orientales (Grenouille rousse *Rana temporaria*, Triton crêté *Triturus cristatus*, Triton ponctué *Lissotriton vulgaris*, Triton alpestre *Ichthyosaura alpestris*, Vipère péliade *Vipera berus*, Lézard vivipare *Zootoca vivipara*, Lézard des souches *Lacerta agilis*...) déclinent plus souvent et plus fortement que les espèces méridionales/occidentales (Barrioz *et al.* 2019 a, b). Certaines de ces dernières sont même stables ou en expansion : la Vipère aspic *Vipera aspis*, la Couleuvre d'Esculape *Zamenis longissimus*, la Couleuvre verte et jaune *Hierophis viridiflavus*, le Lézard des murailles *Podarcis muralis*, le Lézard à deux raies *Lacerta bilineata*, la Grenouille agile *Rana dalmatina*...

Les amphibiens et les reptiles réagissent sensiblement au paramètre thermique. Il s'agit d'ectothermes, c'est-à-dire d'organismes dont la température corporelle est directement dépendante de la température ambiante qui va affecter la physiologie et la plupart de leurs traits d'histoire de vie (la taille à la naissance, le patron de croissance, la maturité sexuelle, la progéniture (nombre de jeunes, taille et sex-ratio), les investissements reproducteurs, la durée de vie...). Par exemple, un suivi durant 23 ans de sites de ponte de Grenouille rousse en

Bretagne a montré que le début des pontes s'était avancé de 27 jours entre 1984 et 2007, et que la hausse des températures notamment hivernales était corrélée à une baisse de la fécondité (Neveu 2009).

Les contraintes hydriques sont également fortes pour les amphibiens (dont la respiration et l'hydratation sont surtout cutanées) mais aussi pour certains reptiles (notamment les espèces caractéristiques des zones humides et/ou du climat océanique et/ou montagnard comme la Vipère péliade et le Lézard vivipare (Lorenzon *et al.* 1999 ; Dezetter *et al.* 2022) : le paramètre « humidité » est donc aussi important (Mallard 2021).

Chez les animaux ectothermes, les besoins thermiques varient au cours de la saison et du cycle de reproduction, et peuvent interagir avec les besoins hydriques. Chez les espèces vivipares (comme la Vipère péliade ou le Lézard vivipare), les besoins hydriques et thermiques dépendent du stade de gestation et influencent la physiologie et le comportement des femelles gestantes. Si la ressource en eau devient limitante des conflits physiologiques vont émerger entre la régulation de la balance hydrique et thermique. Des conflits entre la mère et sa progéniture peuvent alors apparaître. Les travaux de Lourdis *et al.* (2013), Guillon (2014) et Dezetter *et al.* (2021), par exemple, sur la thermorégulation, le métabolisme, la sensibilité hydrique et la phénologie de reproduction de la Vipère péliade montrent que cette « relique glaciaire » présente des adaptations spécifiques au froid qui la rendent particulièrement vulnérable aux températures élevées et à la sécheresse, notamment en période estivale. Lourdis (2022) suggère que les vipères sont de très bons indicateurs des changements globaux, notamment du fait de leur fonctionnement thermo-hydrorégulateur. On retrouve cette double contrainte significative chez d'autres espèces de reptiles. Par exemple, chez le Lézard des souches, d'affinité continentale, c'est la douceur accrue des températures hivernales qui serait le facteur de régression le plus prégnant (en agissant sur le cycle hormonal), puis les sécheresses estivales (Igor Boyer, à paraître).

Les amphibiens en général et les espèces caractéristiques des cortèges pionniers en particulier sont affectés par la baisse des précipitations, au printemps et en été, qui induisent un assèchement prématuré des sites de reproduction qui ne permettent pas la métamorphose complète des larves.

Un autre facteur lié au changement climatique menace les *hotspots* d'amphibiens : l'élévation du niveau de la mer et, par conséquent, la salinisation des zones humides littorales (évolution progressive du biseau salé ou submersion). Les pannes dunaires et les marais arrière-littoraux normands hébergent la plupart des populations des espèces les plus rares et menacées : le Pélodyte ponctué et le Crapaud calamite. En outre, les cinq espèces de tritons de France s'y trouvent (le Triton marbré seulement sur la partie armoricaine). Or ces derniers semblent moins tolérants à la salinité, et pourraient de ce fait être considérés comme des espèces parapluies (Hopkins & Brodie 2015, Barrioz 2016).

En Normandie, les variations climatiques de ces 20 dernières années sont identifiées comme un des facteurs principaux du déclin des populations d'amphibiens (Astruc *et al.* 2021).

Les insectes sont également sensibles à de nombreux paramètres climatiques comme les températures ou le taux d'ensoleillement. Ces facteurs influent sur leurs cycles de reproduction, leurs capacités de développement et de déplacement ou encore leurs taux de survie (Bale et al. 2002). Ces dernières décennies, de nombreuses études ont mis en évidence l'effet des changements climatiques sur les comportements de certains insectes (Pire et al. 2018 ; Bush et al. 2014 ; Parmesan 2007). Ces impacts peuvent se traduire par des modifications d'aires de répartition, des adaptations phénologiques, des changements d'habitats ou même des évolutions morphologiques (Coope 1995).

L'impact le plus perceptible est probablement l'évolution de l'aire de répartition. Selon les affinités écologiques des insectes, cette évolution d'aire peut se traduire soit par une expansion, soit par une contraction (Menendez 2007). Par exemple, 55 espèces de libellules ont étendu leur aire de répartition vers le nord depuis 1990 (Termatt et al. 2019). Différentes adaptations phénologiques ont aussi été mises en évidence. Ainsi, une étude menée en Europe a estimé que depuis 1980, 44 espèces de lépidoptères parmi les 263 taxons étudiés, avaient augmenté leur nombre de générations au cours d'une saison (Altermatt 2009). En Angleterre, les scientifiques ont constaté que plusieurs espèces de papillons diurnes comme nocturnes émergeaient en moyenne une semaine plus tôt qu'à la fin des années 1990 (Macgregor et al. 2019). Enfin, parmi les adaptations morphologiques mises en évidence, il s'avère qu'une espèce libellule (*Coenagrion scitulum*), présente des populations constituées d'individus sensiblement plus gros et puissants dans les secteurs nouvellement colonisés en marge de son aire de répartition (Therry 2014).

En Normandie, les conséquences des modifications climatiques sur les insectes sont encore mal connues. Néanmoins, il semblerait que les espèces d'affinités méridionales/orientales soient plutôt favorisées par ces modifications.

Chez les odonates, plusieurs espèces méridionales ont récemment établi des populations pérennes (Houard & Levrel 2007 ; Houard & Lorthiois 2010) principalement en suivant l'axe Seine. Cependant comme chez les amphibiens, certaines espèces peuvent être impactées par la baisse des précipitations, au printemps et en été, qui induisent un assèchement prématuré des sites de reproduction qui ne permettent pas la métamorphose complète des larves.

Il a été constaté que certaines espèces migratrices de papillons comme *Lampides boeticus*, qui ne visitaient autrefois qu'occasionnellement la Normandie ont vu le rythme et l'intensité de ces phénomènes migratoires augmenter et conduire finalement à l'implantation locale de petites populations (Simon 2016). A l'inverse des espèces d'affinités méridionales en expansion, les espèces d'affinités septentrionales et continentales peuvent paraître plus vulnérables face aux modifications climatiques. Ces espèces, souvent liées à des habitats frais, humides ou ombragés, peuvent être sensibles aux conséquences de l'élévation des températures. Ainsi, plusieurs espèces de rhopalocères liés à des milieux humides ou tourbeux comme *Melitaea diamina* ou *Heteropterus morpheus* sont considérées comme sensibles aux risques climatiques dans l'atlas européen des risques climatiques des

rhopalocères (Settele *et al.* 2008). Selon les scénarios, ces espèces verront leurs aires de répartition se réduire plus ou moins grandement d'ici 2080.

Le groupe des orthoptères connaît aussi actuellement une importante mutation de sa composition en Normandie. Ainsi, au cours des vingt dernières années, ce sont une quinzaine d'espèces (sur 69 – soit plus de 20% du pool régional) qui ont été découvertes ou redécouvertes sur notre territoire (Stallegger *et al.* 2019). Dans le même temps, la liste rouge régionale, a mis en évidence le déclin d'une dizaine d'autres espèces, voire de disparition. L'impact du dérèglement climatique est un des facteurs mis en avant pour expliquer les dynamiques négatives de plusieurs de ces espèces, comme dans le cas dectique verrucivore (*Dectivus verrucivorus*), espèce désormais disparue de Normandie et plus globalement, d'un large quart nord-ouest de la France. Au-delà des dynamiques de populations, nous observons également des changements d'ordre écologique. Ainsi, certaines espèces thermophiles, jadis cantonnées aux milieux les plus chauds et secs (coteaux calcaires) s'observent de plus en plus régulièrement dans des habitats plus mésophiles, voir humides. Nous sommes donc actuellement spectateurs d'une dynamique d'évolution rapide qui ne touche pas seulement quelques espèces, mais bien un cortège dans sa globalité.

D'autres invertébrés comme les **crustacés** et les **mollusques** peuvent être affectés par le changement climatique.

Par exemple, l'Ecrevisse à pattes blanches *Austropotamobius pallipes* est particulièrement vulnérable car les têtes de bassin qu'elle affectionne souffrent de périodes d'assèchement prolongé de plus en plus fréquentes. Cette espèce est également sensible aux grandes variations de températures et de pH. L'acidification des cours d'eau limite en effet sa croissance (calcification de sa carapace) et sa reproduction (Beaune *et al.* 2018). En modélisant les habitats favorables à l'espèce dans différentes projections de conditions climatiques, plusieurs études ont montré un déclin des zones favorables à l'Ecrevisse à pattes blanches en raison du changement climatique et des espèces exotiques envahissantes (Préau 2019).

De même, la Mulette perlière est sensible à la température de l'eau, préférant des eaux froides. L'augmentation de la température de l'eau liée au réchauffement climatique lui est donc défavorable directement et indirectement via l'eutrophisation conséquente. Qui plus est, les modèles des climatologues montrent que le réchauffement s'accompagnera d'une augmentation des événements météorologiques extrêmes : orages importants et crues exceptionnelles. Hastie *et al.* (2001) montrent que les crues peuvent conduire à une mortalité de près de 10 % sur un cours d'eau. Enfin, le réchauffement climatique aura des conséquences sur les stocks de poissons-hôtes (salmonidés) et sur la disponibilité d'habitats favorables et (Hastie *et al.* 2003).

2.1.4. Liste des espèces sentinelles élaborée en 2021–2022

Le choix des espèces sentinelles s'est porté sur des espèces à capacité de dispersion faible possédant une sensibilité climatique marquée afin de pouvoir analyser l'impact des

changements climatiques sur celles-ci à l'échelle régionale. Il s'agit principalement d'espèces ectothermes (insectes, mollusques, amphibiens, reptiles) et d'espèces floristiques. En outre, les espèces cibles sont en régression ou menacées (Mallard & Couderchet 2019). Dans la mesure du possible, les espèces déjà suivies dans les autres régions participant au programme seront retenues. Les espèces sélectionnées pourront jouer le rôle « d'espèces parapluies », en favorisant également la prise en compte d'autres espèces affectées par ces changements.

La liste ci-après présente, par grands milieux, les espèces sentinelles du climat retenues, dans un premier temps, et les espèces ou cortèges suivis en parallèle. Les espèces ou cortèges d'espèces suivis en parallèle peuvent représenter des espèces en expansion (par exemple d'affinité méridionale). Mais l'échantillonnage des sites prendra en compte d'abord les espèces en régression (e.g. signalées dans les Listes rouges).

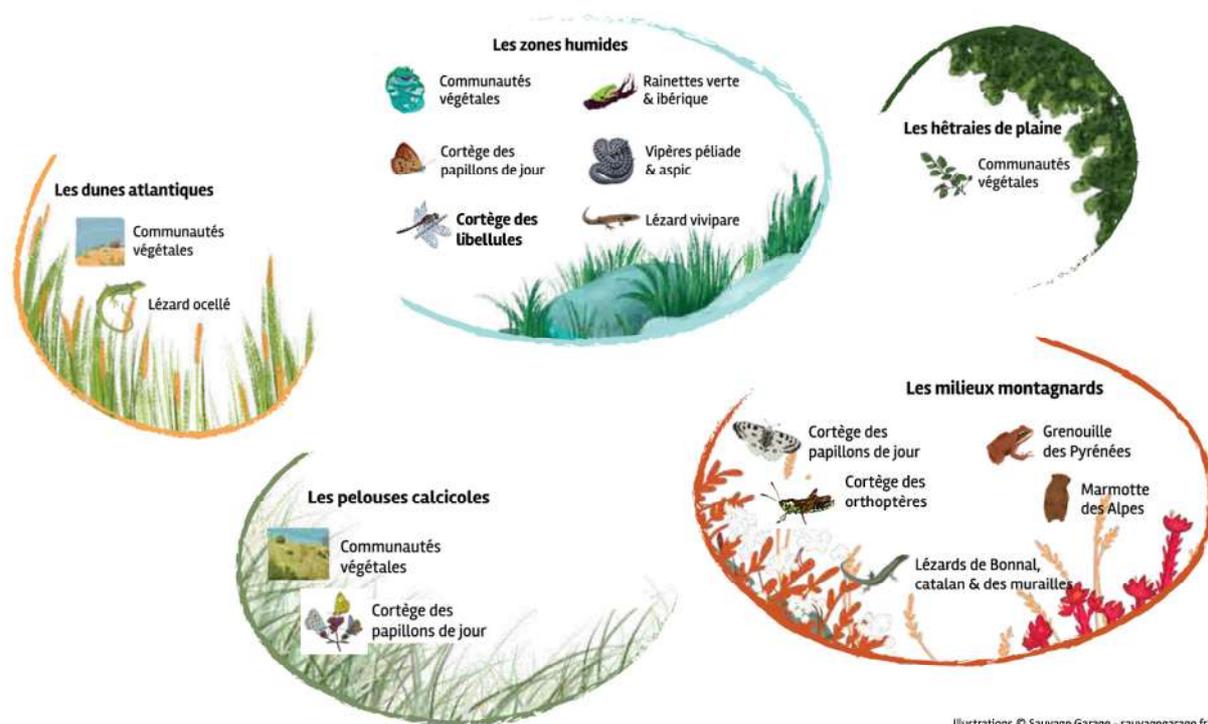


Figure 2 : Indicateurs biologiques espèces ou groupes d'espèces sentinelles du climat en fonction des milieux naturels sensibles au changement climatique en région Nouvelle Aquitaine (Mallard 2021).

- **Milieux humides** (landes humides, tourbières, marais, zones humides liées aux dynamiques fluviales et/ou marine/terrasses, sources et têtes de bassin...)
 - Communautés végétales (bas marais, tourbières, landes humides) et Gentiane pneumonanthe *Gentiana pneumonanthe*, Aconit du Portugal *Aconitum* subsp. *Lusitanicum*, Canneberge *Vaccinium oxycoccus*

- Cortège des reptiles : Vipère péliade *Vipera berus* et Lézard vivipare *Zootoca vivipara* (+ les autres espèces en même temps : Vipère aspic *Vipera aspis*, Lézard des murailles *Podarcis muralis*...)
- Grenouille rousse *Rana temporaria* (+ la Grenouille agile *Rana dalmatina* en même temps)
- Cortège des rhopalocères : Azuré des mouillères *Phengaris alcon*, Miroir *Heteropterus morpheus*, Plusie monnaie *Polychrisia moneta* (+ les autres espèces en même temps, si le protocole retenu le permet)
- Cortège des odonates : Agrion joli *Coenagrion pulchellum* (+ les autres espèces en même temps)
- Cortège des orthoptères : Decticelle des alpages *Metrioptera saussuriana*... (+ les autres espèces en même temps)
- Mulette perlière *Margaritifera margaritifera* et Mulette épaisse *Unio crassus*
- Vertigo étroit *Vertigo angustior* et Vertigo des Moulins *Vertigo moulinsiana*
- Écrevisse à pattes blanches *Austropotamobius pallipes*

- **Milieux secs** (pelouses calcicoles, éboulis, landes sèches...)

- Communautés végétales (pelouse xérophile, pelouse mésophile, éboulis) et Gentiane amère *Gentianella amarella* (les orchidées notamment méditerranéennes et plus globalement le cortège calcicole thermophile pourront être suivis en parallèle), Violette de Rouen *Viola hispidia*
- Cortège des reptiles : Vipère péliade *Vipera berus*, Lézard vivipare *Zootoca vivipara* et Lézard des souches *Lacerta agilis* (+ les autres espèces en même temps : Vipère aspic *Vipera aspis*, Lézard des murailles *Podarcis muralis*, Lézard à deux raies *Lacerta bilineata*...)
- Cortège des rhopalocères : Mélitée des digitales *Melitaea aurelia*, Mélitée de la Lancéole *Melitaea parthenoides*, Virgule *Hesperia comma* (+ les autres espèces en même temps).
- Cortège des orthoptères : Decticelle des alpages *Metrioptera saussuriana* (+ les autres espèces en même temps)

- **Milieux littoraux** (dunes, pannes, marais arrière littoraux, falaises...)

- Communautés végétales (pannes dunaires, pelouses dunaires, vasières) et Scirpe triquètre *Schoenoplectus triqueter*, Linaire des sables *Lineria arenaria* et Diotis maritime *Achillea maritima*, Pyrole maritime *Pyrola rotundifolia maritima*, Épipactis des marais *Epipactis palustris*, Ophioglosse commun *Ophioglossum vulgatum*, Gentiane amère *Gentianella amarella*
- Characées : *Chara polyacantha*, *C. major*, *C. intermedia*
- Cortège des reptiles : Vipère péliade *Vipera berus* et Lézard vivipare *Zootoca vivipara* (+ les autres espèces en même temps : Vipère aspic *Vipera aspis*, Lézard des murailles *Podarcis muralis*...)

- Cortège des tritons *Triturus cristatus*, *T. marmoratus*, *Lissotriton helveticus*, *L. vulgaris*, *Ichthyosaura alpestris*
 - Grillon maritime de la Manche *Pseudomogoplistes vicentae septentrionalis*
 - Cortège des coléoptères aquatiques (mares rétrolittorales)
- **Milieux forestiers** (hêtraies/chênaies atlantiques, forêts de ravins...)
- Communautés végétales (hêtraie hyper atlantique, végétation parois suintantes intraforestières) et Polypode du hêtre *Phegopteris connectilis*, Phégoptéride commune *Phegopteris connectilis*, Oreoptéris à sores marginaux *Oreopteris limbosperma*... Hyménophylle de Tunbridge *Hymenophyllum tunbrigense*
 - Cortège des reptiles : Vipère péliade *Vipera berus*, Lézard vivipare *Zootoca vivipara* et Lézard des souches *Lacerta agilis* (+ les autres espèces en même temps : Vipère aspic *Vipera aspis*, Lézard des murailles *Podarcis muralis*, Lézard à deux raies *Lacerta bilineata*...)
 - Cortège des coléoptères saproxyliques (*Platysoma angustatus*, *Acanthocinus reticulatus*, *Acmaeops marginatus*, *Microbregma emarginatum*...)

2.2. Choix des protocoles et des stations météorologiques (mésoclimat)

Le choix des protocoles et la stratégie d'échantillonnage sont en cours de construction et s'appuient sur l'expérience menée en Nouvelle Aquitaine (Mallard 2016b, Mallard & Couderchet 2019, Mallard 2021) :

Les recherches sur le terrain des effets du changement climatique sont essentielles pour alimenter des expériences de laboratoires, pour définir des « modèles » d'évolution des espèces, de leurs habitats, pour comprendre les interactions, pour choisir des modèles mathématiques d'agrégation de données, d'extrapolation des observations avec les dispersions et les incertitudes associées. Il s'agit de comprendre la relation entre les variations climatiques et la réponse de la biodiversité. La mise en place de protocoles de suivis à long terme des indicateurs climatiques et biologiques répertoriés, standardisés et adaptés à la problématique du changement climatique est nécessaire (cf. tab. Excel en annexe : exemples de protocoles envisagés en Normandie).

Les **protocoles de suivi d'espèces** doivent dans la mesure du possible reprendre des protocoles déjà existants en Nouvelle Aquitaine ou au niveau national. Les protocoles déjà utilisés en Normandie peuvent aussi être proposés.

En règle générale, le cadre méthodologique devra chercher à suivre des cortèges d'espèces plutôt que des espèces seules. Par exemple, les protocoles : ICOCAM (GRETIA) pour les coléoptères aquatiques, STERF (MNHN) pour les rhopalocères, STELI (MNHN) pour les

odonates, ainsi que POPAmphibien (SHF) et POPReptile (SHF), pour les groupes évoqués. En revanche, l'échantillonnage sera construit à partir des espèces sentinelles du climat.

A titre d'exemple, le groupe fonctionnel des coléoptères saproxyliques bénéficie d'un protocole d'inventaire stationnel national. Il s'agirait de le mettre en œuvre sur plusieurs stations au sein de cinq hêtraies, soit une par département, sélectionnées car s'inscrivant dans des contextes biogéographiques différents. L'étude comparative des cortèges saproxyliques et de leurs tendances d'évolution permettrait de mettre en évidence les processus écologiques à l'œuvre sous l'effet des changements climatiques. A l'inverse, il n'existe pas de programme national pour évaluer les dynamiques spatiales et quantitatives des orthoptères mais un protocole de suivi, basé sur le principe des ILA (Indices Linéaires d'Abondance) a été récemment initié dans le cadre du Plan Régional d'Action en faveur des coteaux calcaires. En 2021, 13 sites secs (coteaux calcaires ou landes), principalement localisés dans les départements de l'Eure et de Seine-Maritime ont fait l'objet de ce suivi standardisé. Nous proposons que ce protocole intègre le programme et soit étendu aux habitats humides.

Par ailleurs pour les communautés végétales les suivis seront fondamentalement basés sur la méthodologie phytosociologique à l'instar de ceux du CBN Sud-Atlantique en Nouvelle-Aquitaine. Les relevés phytosociologiques seront réalisés selon un échantillonnage soit sur transect dans le cas de gradients écologiques existants (humidité, topographie) soit surfacique et représentatif des végétations sélectionnées. Ainsi les suivis déjà réalisés par le CBN et/ou ses partenaires dans certains sites et ceux du projet BRANCH² pourront également être intégrés à la démarche.

Une soixantaine de **stations météorologiques** pourraient être installées selon la stratégie d'échantillonnage présentée ci-après (cf. 2.3.). Le modèle retenu pour l'instant est HOB0 U23 Pro v2, Hobo® comme en Nouvelle Aquitaine, afin de garder la cohérence avec le programme original dans l'analyse des données (Mallard 2016b) : la station météorologique est une station autonome à faible consommation disposant d'une mémoire suffisante pour enregistrer au minimum une année de suivi.

Ce matériel a été utilisé, testé et validé dans le cadre d'une étude sur les effets du changement climatique sur la phénologie des essences d'arbres en zone tempérée européenne (Vitasse *et al.*, 2011). La plage de fonctionnement du capteur U23-002 de température externe est de -40° à 70°C. La précision est de ± 0,21°C de 0° à 50°C et la résolution 0,020°C à 25°C. La stabilité (dérive) dans le temps est inférieure à 0,1°C par an. La plage de fonctionnement du capteur d'humidité relative U23-002 est de 0-100% HR, -40° à 70°C. La précision est ± 2,5% de 10% à 90% HR, avec un maximum de ± 3,5% et une résolution de 0,03%. La stabilité (dérive) est inférieure à 1% par an. La plage de fonctionnement du logger est de -40° à 70°C. L'horloge en temps réel est de ± 1 minute par mois de 0° à 50°C. La batterie 1/2 AA, 3.6 Volt lithium est autonome pour une utilisation standard pendant maximum 3 ans avec un intervalle d'enregistrement de 1 minute ou plus. La mémoire est de

² BRANCH : *Biodiversity Requires Adaptation in Northwest Europe Under Changing Climate Interreg 2005-2007.*

64 Ko (environ 21 000 mesures de température et d'humidité relative). Les sondes et l'enregistreur sont résistants à la submersion brève et à la pluviométrie.

Sur chaque site, les capteurs sont installés à 1,10 m–1,50 m au-dessus du sol à proximité des points d'échantillonnage des populations, en conditions représentatives des conditions du suivi flore et faune (milieu ouvert, lisière, etc.) et à l'abri des regards pour éviter les éventuelles dégradations, à une distance maximum de 100 m (exemple Fig. 3). Dans certains sites des stations ont été placées à 10–50 cm au-dessus du sol, en fonction des indicateurs biologiques (Mallard 2021).



Figure 3 : Station météorologique sur un site d'étude du programme Les sentinelles du climat Nouvelle Aquitaine en pelouse calcicole.

Les données sont enregistrées toutes les heures toute l'année soit 17520 données (24h x 365 jours x 2 mesures de température et humidité relative) par station météorologique. Tous les capteurs sont inter-calibrés avant l'installation sur le terrain.

Des propositions complémentaires peuvent être néanmoins émises par le CS et le GIEC normand, notamment si des projets de recherche se mettent en place selon une approche microclimatique. D'ailleurs, au terme de la phase 1 du programme aquitain une réflexion est menée actuellement quant au choix du matériel et de l'échantillonnage.

Dans tous les cas, il faudra autant que possible optimiser la présence des stations météorologiques en réalisant un maximum de suivis sur les mêmes sites avec plusieurs espèces. Les stations météorologiques sont ainsi associées aux suivis d'un ou plusieurs taxons, globalement des suivis floristiques couplés à des suivis faunistiques.

2.3. Choix des sites

En première approche, 15 sites par grand type de milieu (humide, sec, littoral et forestier) sont envisagés. Les suivis seront réalisés en priorité par les gestionnaires qui le souhaitent. Les structures naturalistes (observatoires thématiques ou autres) pourront assurer une partie des suivis si nécessaire. A l’instar des suivis néo-aquitains, en moyenne entre 10 et 20 sites suivis par espèce sentinelle seront visés quand cela est possible.

Les sites suivis représentent un échantillon du domaine vital des espèces sentinelles du climat. Plusieurs sites concernant la même espèce (ou cortège d’espèces) peuvent se trouver dans un même espace naturel à partir du moment où ils sont suffisamment éloignés (au moins 2 km) les uns des autres en deux populations distinctes pour éviter de fausser le plan d’échantillonnage et le double comptage.

Les sites suivis sont choisis selon trois critères (Mallard 2021) :

- **Les sites doivent être en bon état de conservation et favorable aux espèces sentinelles** de sorte à éviter les biais liés à l’état de ces habitats et limiter l’influence d’autres facteurs anthropiques (artificialisation, pollution, transformations agricoles, etc..) qui pourraient également affecter la biodiversité.
- **Les sites doivent être situés dans des milieux gérés** dans un objectif de maintien en bon état de conservation des populations et de leurs habitats durant au moins toute la période d’étude du programme (gestion constante).
- **Les sites doivent le plus possible permettre des suivis multi-espèces** sentinelles du climat (notamment des suivis floristiques associés à des suivis faunistique).

Cependant, dans certains cas, en fonction des questions posées et des hypothèses à tester, des suivis pourraient être réalisés dans des sites non spécifiquement gérés pour la ou les espèces cibles, notamment selon le principe des « sites témoins ». De même, une réflexion devrait être menée pour intégrer le milieu bocager dans la déclinaison normande, au vu de son importance régionale. Par exemple, au sein d’une unité bocagère donnée, des suivis de la Vipère péliade et du Lézard vivipare pourraient être envisagés dans des parcelles bénéficiant d’un programme de replantation de haies et dans des parcelles témoins. L’idée est ici d’essayer de mieux comprendre le rôle des haies, en tant qu’éléments atténuateurs des conséquences du changement climatique sur des espèces dépendantes d’un fonctionnement thermo-hydrorégulateur.

Conclusion

Dans le contexte du changement climatique, le conseil scientifique normand (CS) du programme *les sentinelles du climat* et Cistude Nature ont élaboré en 2022 une liste régionale d'indicateurs biologiques (espèces ou groupe d'espèces) par grand milieu. Certaines espèces peuvent être suivies dans plusieurs types de milieux.

L'étape suivante est la mise en place de l'échantillonnage en collaboration avec les gestionnaires d'espaces naturels. Les sites retenus en priorité seront ceux hébergeant le plus d'espèces sentinelles du climat. Ce travail sera réalisé sur la période 2022–2024.

Dans le même temps, les protocoles de suivis seront affinés et validés. D'ailleurs certains d'entre eux sont déjà éprouvés et respectent les critères de sélection : programmes validés au niveau national, appliqués en Nouvelle Aquitaine (et/ou en Normandie) et permettant de suivre des groupes d'espèces aux tendances différentes. Il s'agit de POPReptile pour les reptiles, de POPAmphibien pour les amphibiens, de STELI pour les odonates, de STERF pour les rhopalocères, d'ICOCAM pour les coléoptères aquatiques, de l'ISN des coléoptères saproxyliques... Un protocole régional basé sur le principe d'Indices Linéaires d'Abondance a également été testé en 2021 pour suivre les orthoptères ; il est envisagé de le déployer dans le cadre du programme.

La présentation détaillée des protocoles de suivis des espèces finalement retenues et de l'échantillonnage des sites sera effectuée au fur et à mesure des avancées du CS en lien étroit avec les gestionnaires. La publication d'un document de synthèse est prévue pour 2024–2025.

Bibliographie

- Altermatt, F. 2010 – Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1685), 1281–1287.
- 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.
- Astruc G., Miaud C., Besnard L. & Barrioz M. 2021 – Le déclin alarmant des amphibiens de France: L'exemple étayé de la Normandie. *Bull. Soc. Herp.* 178. doi : 10.48716/bullshf.178-4
- Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., ... & Whittaker, J. B. 2002 – Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global change biology*, 8(1), 1–16.
- Barrioz M. & Lerest M. 2019a – Les amphibiens de Normandie. *Les indicateurs Biodiversité de Normandie*. 20 p. URCPiE de Normandie/OBHeN, ANBDD. <https://www.anbdd.fr/biodiversite/connaissance/les-indicateurs-normands-de-la-biodiversite/amphibiens/>
- Barrioz M. & Lerest M. 2019b – État des populations de reptiles en Normandie. *Les indicateurs Biodiversité de Normandie*. 14 p. URCPiE de Normandie/OBHeN, ANBDD. <https://www.anbdd.fr/biodiversite/connaissance/les-indicateurs-normands-de-la-biodiversite/les-reptiles/>
- Barrioz M. 2016 – Occurrence des amphibiens dans les milieux saumâtres du département de la Manche (Normandie, France) et succès de la reproduction. *Bull. Soc. Herp. Fr.* 158 : 1–12.
- Baune D., Sellier Y., Luquet G., & Grandjean F. 2018 – Freshwater acidification : An example of an endangered crayfish species sensitive to pH. *Hydrobiologia* 813(1), 41–50.
- Bush, A. A., Nipperess, D. A., Duursma, D. E., Theischinger, G., Turak, E., & Hughes, L. 2014 – Continental-scale assessment of risk to the Australian Odonata from climate change. *PloS one* 9(2), e88958.
- Cantat O., Laignel B., Z. Nouaceur Z & Costa S. 2022 – Changement climatique et aléas météorologiques. Synthèse réalisée par l'ANBDD. *Giec normand* 1.
- Chéreau L., Etienne S. & Simon A., 2022. – *Sentinelles du climat en Normandie : préfiguration 2022 – Note commune de restitution proposant une première liste d'espèces à suivre*. Note technique du CEN Normandie, du GRETIA et de l'ONF pour l'URCPiE de Normandie, l'Office Français de la Biodiversité et le Département de la Manche (Document en cours de relecture).
- Ceballos G., Ehrlich P. R., Barnosky A. D., Garcia A., Pringle R. M. & Palmer T. M. 2015. – Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1 5) : e1400253 doi : 10.1126/sciadv.1400253.
- Coope, G. R. 1995 – *The effects of Quaternary climatic changes on insect populations: lessons from the past* (pp. 30–39). Academic Press, San Diego, CA, USA.

- Dezetter M, Le Galliard JF, Guiller G, Guillon M, Leroux-Coyau M, Meylan S, Brischoux F, Angelier F, Lourdais O. 2021 – Water deprivation compromises maternal physiology and reproductive success in a cold and wet adapted snake *Vipera berus*. *Conserv Physiol* 9(1): coab071; doi:10.1093/conphys/coab071
- Dezetter M., Dupoué A., Le Galliard J.-F. & Lourdais O. 2022 – Additive effects of developmental acclimation and physiological syndromes on lifetime metabolic and water loss rates of a dry-skinned ectotherm. *Functional Ecology, Wiley* 36(2), pp.432–445. 10.1111/1365-2435.13951. hal-03405913
- Guillon M. 2012 – De la physiologie à la répartition : adaptations climatiques et sensibilité thermique chez une relique glaciaire. Thèse sous la direction de Olivier Lourdais – Université de Poitiers.
- Hopkins, G. R., & Brodie Jr, E. D. 2015 – Occurrence of amphibians in saline habitats: a review and evolutionary perspective. *Herpetological Monographs* 29(1), 1–27.
- Houard X., Levrel B., 2007– Implantation de *Sympetrum fonscolombii* (Selys, 1840) dans le département de Seine-Maritime (Haute-Normandie) (Odonata, Anisoptera, Libellulidae). *Martinia*, 23 (2) : 58.
- Houard X., Lorthiois M., 2010 – Premiers indices formels d'autochtonie d'*Anax parthenope* (Selys, 1839) en Haute-Normandie (Odonata, Anisoptera : Aeshnidae). *Martinia* 26 (1-2) : 39–40.
- IPBES, 2019 – *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneeth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages.
- Langlois E., Chéreau L., Niquil N. & Dauvin J.C. 2022 – Biodiversité continentale et marine. Synthèse réalisée par l'ANBDD. *Giec normand* 3.
- Lobry E., Mallard F. & Couderchet L. 2018 – Programme les sentinelles du climat. Tome V : Prise en compte des éléments paysagers dans la modélisation des répartitions des espèces sentinelles du climat. C. Nature. hal-02060194 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02060194/document>
- Lorenzon P, Clobert J, Oppliger A, John-Alder H 1999 – Effect of water constraint on growth rate, activity and body temperature of yearling common lizard (*Lacerta vivipara*). *Oecologia* 118: 423–430. <https://doi.org/10.1007/s004420050744>.
- Lourdais O, Guillon M, Denardo D & Blouin-Demers G 2013 – Cold climate specialization: adaptive covariation between metabolic rate and thermoregulation in pregnant vipers. *Physiol Behav* 119: 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2013.05.041>.

- Lourdais O. 2022 – *Les Vipères, sentinelles des changements globaux*. Conférence plénière du 49^e Congrès de la Société Herpétologique de France, 6–8 octobre 2022, Belleville-en-Beaujolais (69).
- Macgregor, C. J., Thomas, C. D., Roy, D. B., Beaumont, M. A., Bell, J. R., Brereton, T. & Hill, J. K. 2019 – Climate-induced phenology shifts linked to range expansions in species with multiple reproductive cycles per year. *Nature communications* 10(1), 1–10.
- Mallard F. (coord.), 2021. Programme Les sentinelles du climat – Tome X : Réponses des espèces animales et végétales face au changement climatique et pistes d’actions de conservation de la biodiversité en région Nouvelle-Aquitaine, C. Nature : Le Haillan, Gironde, 724p.
- Mallard F. & Couderchet L. 2019. – *Climate Sentinels Research Program: Developing Indicators of the Effects of Climate Change on Biodiversity in the Region of New Aquitaine (South West, France)*. Dans : Leal Filho W, Barbir J, Preziosi R. *Handbook of Climate Change and Biodiversity*. Cham : Springer International Publishing, p. 223-241. doi : 10.1007/978-3-319-98681-4_14.
- Mallard F. (coord.), 2016a – Programme Les sentinelles du climat. Tome I : Développement d’indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle Aquitaine C. Nature : Le Haillan, Gironde, France, 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, C. Nature : Le Haillan, Gironde, France, 453 p.
- Martin G., 2018 – Modification des communautés végétales en contexte de changement global, Apports des jeux de données nationaux pour caractériser les effets du changement climatique et des interactions plantes–pollinisateurs, Thèse, 304p.
- Menéndez, R. 2007 – How are insects responding to global warming? *Tijdschrift voor Entomologie* 150(2), 355.
- Muths, E., Chambert, T., Schmidt, B. R., Miller, D. A. W., Hossack, B. R., Joly, P. & Grant, E. C. 2017 – Heterogeneous responses of temperate-zone amphibian populations to climate change complicates conservation planning. *Scientific Reports* 7(1), 1–10.
- Neveu, A. 2009 – Incidence of climate on common frog breeding: Long-term and short-term changes. *Acta Oecologica* 35(5), 671–678.
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P., & Martínez-Rica, J. P. 2007 – Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global environmental change*, 17(3–4), 420–428.
- Parmesan, C. 2007 – Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, 13(9), 1860–1872.
- Pimm S. L., Jenkins C. N., Abell R., Brooks T. M., Gittleman J. L., Joppa L. N., Raven P. H., Roberts C. M. & Sexton J. O., 2014. – The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science* 344 (6187) : 1246752 doi : 10.1126/science.1246752.

- Pires, M. M., Périco, E., Renner, S., & Sahlén, G. (2018). Predicting the effects of future climate change on the distribution of an endemic damselfly (Odonata, Coenagrionidae) in subtropical South American grasslands. *Journal of Insect Conservation* 22(2), 303–319.
- Pörtner, H.O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P. A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman, E., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A. P. F., Popp, A., Reyes-García, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y. J., Sintayehu, D. W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A.L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D.C., Rogers, A.D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N., Ngo, H.T. 2021. – IPBES-IPCC cosponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538.
- Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kühn, I., Van Swaay, C., Verovnik, R. & Schweiger, O. 2008 – *Climatic risk atlas of European butterflies* (p. 710). BioRisk 1 Special Issue.
- Simon, A. 2016 – Expansion de quatre espèces d’insectes d’affinités méridionales en Normandie (Odonata – Rhopalocera – Orthoptera – Coleoptera). *L’entomologiste haut-normand* 6 : 2–10.
- Stallegger Peter (Coord.). 2019 – Sauterelles, grillons, criquets, sauterelles perce-oreilles, mantes et phasmes de Normandie. Invertébrés armoricains, les cahiers du GRETIA, 19. 226 p.
- Steigerwald, E. 2021 – Impacts Of Climate Change On Amphibians. *AmphibiaWeb*. <https://amphibiaweb.org/declines/climatechange.html>. University of California, Berkeley, CA, USA.
- Termaat, T., van Strien, A. J., van Grunsven, R. H., De Knijf, G., Bjelke, U., Burbach, K. & WallisDeVries, M. F. 2019 – Distribution trends of European dragonflies under climate change. *Diversity and Distributions* 25(6), 936–950.
- Therry, L., Gyulavári, H. A., Schillewaert, S., Bonte, D., & Stoks, R. 2014 – Integrating large-scale geographic patterns in flight morphology, flight characteristics and sexual selection in a range-expanding damselfly. *Ecography* 37(10), 1012–1021.
- Vitasse Y., Christophe François C., Nicolas Delpierre N. , Dufrêne E., Kremer A., Chuine I. , Delzon S. 2011 – Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agric. Forest Meteorol.*, doi:10.1016/j.agrformet.2011.03.003
- Zhang Z, Capinha C, Usio N, et al. 2019 – Impacts of climate change on the global potential distribution of two notorious invasive crayfishes . *Freshwater Biology* 5:353–365. Doi: 10.1111/fwb.13429

Résumé

Le programme de recherche-action « les sentinelles du climat » vise à mieux connaître les effets locaux du changement climatique sur la biodiversité, qu'ils concernent la phénologie, l'écophysiologie ou la répartition des espèces. La finalité est de contribuer aux politiques environnementales. Cette démarche a été élaborée en 2016 par l'association Cistude Nature, en collaboration avec ses partenaires de Nouvelle-Aquitaine et un conseil scientifique interrégional.

En 2021-2022, à l'initiative de l'Union Régionale des Centres Permanents d'Initiatives pour l'Environnement de Normandie, un collectif de scientifiques composé de naturalistes, géographes, climatologues, hydrologues, biostatisticiens..., a réfléchi à une déclinaison normande. Une première liste d'espèces sentinelles du climat a été élaborée. Il s'agit de taxons appartenant à la flore et à la faune ectotherme. Ces indicateurs biologiques sont climato-sensibles, en régression et possèdent des capacités de dispersion assez faibles.

Les bases de données naturalistes existantes pourront être consultées et croisées aux variables climatiques afin d'identifier une probabilité de répartition potentielle de référence au présent et dans le futur de ces espèces. En complément de cette approche macroclimatique, des suivis protocolés seront réalisés au niveau mésoclimatique. Un échantillonnage régional de sites est en cours d'élaboration à partir de cette liste d'espèces. Un dernier niveau d'analyse est possible selon les questionnements scientifiques à l'échelle microclimatique, à l'aide de sondes disposées de manière à reproduire le choix préférentiel des individus pour certains microhabitats afin de mieux comprendre l'effet du milieu sur la température corporelle d'espèces ectothermes.

Le cadre méthodologique devra permettre de suivre des cortèges d'espèces, dont des espèces potentiellement en expansion, plutôt que des espèces seules. En outre, les espèces sentinelles du climat sélectionnées pourront jouer le rôle « d'espèces parapluies », en favorisant aussi la préservation d'écosystèmes résilients.

Mots clés : biodiversité, biologie de la conservation, changement climatique, chorologie, écophysiologie, espèce parapluie, faune ectotherme, flore, indicateur biologique, modélisation, répartition, phénologie, protocole d'échantillonnage.