



HAL
open science

Analyse des signes de rupture écologique et identification des sentinelles écologiques de l'anthropocène dans le Massif du Sancy

Alexandra Bellemin-Bertaz

► **To cite this version:**

Alexandra Bellemin-Bertaz. Analyse des signes de rupture écologique et identification des sentinelles écologiques de l'anthropocène dans le Massif du Sancy. *Ecosystèmes*. 2024. dumas-04930904

HAL Id: dumas-04930904

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04930904v1>

Submitted on 5 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

ANALYSE DES SIGNES DE RUPTURE ECOLOGIQUE ET
IDENTIFICATION DES SENTINELLES ECOLOGIQUES DE
L'ANTHROPOCENE DANS LE MASSIF DU SANCY

Alexandra Bellemin-Bertaz

AEST 2023-2024

Maître de stage : Antoine Tardif (UniLaSalle Rennes)

& Rebecca Etienne (AgroParisTech Clermont-Ferrand)

Tuteur pédagogique : Adrien Pinot (VetAgro Sup)

L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup.

Table des matières

Table des matières.....	5
Remerciements.....	7
Table des abréviations.....	9
Tables des figures	10
Tables des annexes.....	1
Introduction.....	1
1 Etat de l’art et concepts clés	4
1.1 Anthropocène	4
1.2 Limites planétaires	5
1.3 Ruptures écologiques	7
1.4 <i>Early warning signals</i>	8
1.5 Sentinelle.....	8
1.5.1 Sentinelles pour évaluer les ruptures écologiques de l’Anthropocène	9
1.5.2 Résilience et sensibilité des sentinelles écologiques : un système d’ <i>early warning signals</i>	9
1.5.3 La sentinelle dans le projet STar.....	10
1.6 Problématisation.....	12
2 Méthodes	13
2.1 Recherche bibliographique.....	14
2.2 Cartographie pour la définition des zones d’intérêt dans le Massif du Sancy	15
2.3 Caractérisation du territoire d’étude.....	15
2.4 Entretiens exploratoires avec partenaires et acteurs territoriaux.....	17
2.5 Construction d’une base de données sentinelles	18
2.6 Etude du degré de « sentinalité »	19
3 Résultats.....	21
3.1 Identification des ruptures écologiques et des zones d’intérêt écologique du territoire par la cartographie.....	21
3.2 Identification et caractérisation de sentinelle écologique à partir de la base de données ...	22
3.2.1 Les espèces.....	23
3.2.1.1 Caractérisations des espèces selon les taxons.....	23
3.2.1.2 Caractérisations des espèces selon l’habitat	24
3.2.1.3 Caractérisations des espèces selon le statut de l’espèce	25
3.2.2 Les milieux ressources et infrastructures	25
3.2.3 Analyse des ruptures et menaces	26

3.3	Evaluation de la « sentinalité » des entités écologiques à partir de la grille de sentinalité.	26
3.3.1	L'exemple du chat forestier	28
3.3.2	L'exemple de l'étage subalpin du Massif du Sancy	29
3.3.3	L'exemple du Campagnol terrestre.....	30
3.3.4	L'exemple des cyanobactéries	31
3.3.5	L'exemple de l'eau	32
4	Discussion.....	34
4.1	Pertinence de la base de données sentinelle et de la grille de sentinalité.....	34
4.2	Limites de la base de données	36
4.2.1	Sélection des espèces sentinelles	36
4.2.2	Visibilité et intérêt des espèces	36
4.2.3	Complexité d'utilisation.....	37
4.2.4	Domaine de validité des résultats obtenus	37
4.3	Perspectives et recommandations.....	38
4.3.1	Enrichissement de la base de données	38
4.3.2	Perspectives de cartographie sensible des sentinelles territoriales	38
4.3.3	Approche transdisciplinaire et flexible du sujet.....	38
	Conclusion	39
	Bibliographie.....	40
	Annexes.....	44

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Antoine Tardif, mon maître de stage, et Rebecca Etienne, mon encadrante au sein du Projet STar. Votre sympathie et votre bienveillance ont rendu cette expérience non seulement enrichissante, mais également très agréable. Merci de m'avoir fait confiance, pour votre temps, votre patience, et pour avoir toujours été présents avec le sourire. Vous m'avez transmis savoir et compétences avec une générosité qui a été particulièrement précieuse pour moi.

Je tiens également à remercier Karim Berthomé pour son enthousiasme qui a su rendre chaque échange, et journée de terrain stimulants, ainsi que Thierry Leroy, pour sa gentillesse, sa disponibilité, et ses conseils qui m'ont beaucoup aidé dans l'aboutissement de ce mémoire.

Merci aussi à Adrien Pinot, mon enseignant référent, pour son encadrement tout au long de mon stage.

Ma reconnaissance va aussi à toutes les personnes avec qui j'ai pu m'entretenir et échanger au cours de ce projet. Votre gentillesse, et l'intérêt que vous avez porté à mon travail m'ont profondément touchée et ont enrichi cette expérience bien au-delà de mes attentes.

Merci beaucoup à tous mes collègues du Projet STar et d'AgroParisTech Clermont-Ferrand pour l'accueil si chaleureux et l'ambiance conviviale qui ont rendu ces six mois non seulement productifs, mais aussi très agréables. Votre camaraderie a été une véritable source de joie au quotidien. Merci aussi à l'équipe de Cyclann pour votre accueil lors de ma visite à Rennes.

Enfin, je ne saurais oublier mes proches, dont le soutien constant durant mes études a été essentiel. Merci du fond du cœur à mes encadrants, collègues, amis et famille qui ont consacré du temps à la relecture de ce mémoire, et qui, par leurs conseils, leurs encouragements, et leur amitié, ont grandement contribué à sa finalisation.

Table des abréviations

AOP : Appellation d'Origine Protégée

AuRA : Auvergne-Rhône-Alpes

CBN : Conservatoire Botanique Nationale

CC : Creative Commons

CEN : Conservatoire des Espaces Naturels

CPIE : Centre Permanent d'Initiatives pour l'Environnement

EEE : Espèces Exotiques Envahissantes

ESOD : Espèces Susceptibles d'Occasionner des Dégâts

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

IGN : Institut Géographique National

PNRVA : Parc Naturel Régional des Volcan d'Auvergne

RNN : Réserve Nationale Naturelle

RNNCS : Réserve Nationale Naturelle Chastreix-Sancy

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

WFS : *Web Feature Service*

WMS : *Web Map Service*

ZICO : Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux

ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique

Tables des figures

Figure 1: Le dernier cycle glaciaire de $\delta^{18}\text{O}$ (indicateur corrélé à la température de l'air ambiant) et certains événements historiques (Rockström et al., 2009).....	5
Figure 2: L'évolution de la représentation des limites planétaires et leur dépassement (Azote for Stockholm Resilience Centre, 2012).....	6
Figure 3: Schéma de la méthodologie de recherche	13
Figure 4: Représentation cartographique du terrain d'étude du Massif du Sancy au sein du PNRVA ainsi que du relief.....	16
Figure 5: Représentation cartographique des zones d'intérêts écologiques sur le Massif du Sancy.....	22
Figure 6: Représentation graphique de la répartition du nombre d'espèces sentinelle par taxons en fonction de leur habitat	24
Figure 7: Représentation schématique de la sentinalité du chat forestier	28
Figure 8: Représentation schématique de la sentinalité de l'étage subalpin dans le Massif du Sancy	29
Figure 9: Représentation schématique de la sentinalité du campagnol, de la cyanobactérie et de l'eau	31
Figure 10: Arbre décisionnel de la typologie de la sentinelle territoriale.....	35
Figure 11: Arbre décisionnel de la typologie de la sentinelle territoriale avec le poste sentinelles en propriété discriminante	36

Tables des annexes

Annexe 1	Représentation cartographique de la zone AOP Saint Nectaire sur le Massif du Sancy	45
Annexe 2	Tableau récapitulatif des entretiens exploratoire réalisé dans le cadre de cette étude pour le projet STar.....	46
Annexe 3	Représentation cartographique des ZICO sur le Massif du Sancy	47
Annexe 4	Représentation cartographique des ZNIEFF sur le Massif du Sancy	47
Annexe 5	Représentation cartographique des zone Natura 2000 sur le Massif du Sancy	48
Annexe 6	Représentation cartographique du réseau hydrologique sur le Massif du Sancy.....	48
Annexe 7	Représentation cartographique des zones de transport et de bâti sur le Massif du Sancy	49
Annexe 8	: Aperçu de la base de données sentinelle écologique feuille 1 : Ressource bibliographique	50
Annexe 9	Aperçu de la base de données sentinelle écologique feuille 2 : Espèces	51
Annexe 10	Aperçu de la base de données sentinelle écologique feuille 3 : Milieux	52
Annexe 11	Aperçu de la base de données sentinelle écologique feuille 4 : Ressources et Infrastructures	53
Annexe 12	Grille de sentinalité	54

Introduction

En 2024, les températures mondiales continuent de battre des records, avec des moyennes globales atteignant des niveaux sans précédent (Borenstein, 2024). Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), les années récentes ont vu des températures qui dépassent de manière significative les moyennes historiques, en grande partie en raison des activités humaines dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de mutations (OMM, 2024). Cette tendance inquiétante souligne l'urgence de comprendre et de réagir face aux dynamiques environnementales actuelles.

Dans ce contexte, les concepts d'Anthropocène, de sentinelle et de ruptures écologiques sont essentiels pour appréhender les transformations en cours. L'Anthropocène, terme introduit par Crutzen (2002), désigne une nouvelle époque géologique caractérisée par l'impact significatif et global des activités humaines sur la Terre. D'après Bonneuil et Fressoz (2013), la période retenue par le groupe de travail sur l'anthropocène commence à partir de la moitié du XX^{ème} siècle, mais d'après Crutzen (2002), il s'agirait plutôt de la fin du XIX^{ème}. Ces activités ont provoqué des changements climatiques, la destruction des habitats et une pollution généralisée, entraînant des ruptures écologiques profondes (Crutzen, 2002).

L'étude des ruptures écologiques d'un territoire est importante dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de mutations profondes des paysages naturels et anthropisés (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023). Les ruptures écologiques font référence à des changements significatifs dans les écosystèmes, souvent causés par des facteurs tels que le changement climatique, les activités humaines ou des perturbations naturelles majeures (Scheffer *et al.*, 2001).

A l'origine vues comme des événements rares et destructeurs, elles sont maintenant considérées comme normales dans la dynamique des écosystèmes (Rykiel Jr, 1985). L'urbanisation, l'agriculture intensive, la pollution chimique et lumineuse, ainsi que la surexploitation des ressources contribuent à la fragmentation des habitats naturels et à la perturbation des écosystèmes. Ces changements imposent des défis majeurs à la conservation de la biodiversité et nécessitent des mesures pour restaurer et préserver les continuités écologiques (Cucherousset *et al.*, 2015).

Pour mieux comprendre et répondre à ces défis, il est crucial d'identifier des sentinelles écologiques, qu'il s'agisse d'espèces ou de systèmes écologiques (Rykiel, 1985). En écologie, une sentinelle désigne une entité capable d'« alerter sur un dysfonctionnement ou un déséquilibre du milieu » (Toma, 2009). Elles permettent de surveiller les effets du changement climatique et d'autres impacts anthropiques sur les écosystèmes.

C'est dans cette perspective que le projet **STar 2024-2025**, intitulé « **Sentinelles Territoriales de l'Anthropocène : vers une méthode de caractérisation et d'animation territoriale pour se saisir des enjeux de l'Anthropocène** », vise à élaborer une méthode innovante, comme l'utilisation d'un transect qui sera développer dans la suite de ce document.

Le projet a pour but de mieux caractériser les manifestations de l'Anthropocène et de renforcer l'animation territoriale. Le projet STar est piloté par AgroParisTech, structure d'accueil de ce stage, un établissement de recherche et de formation français spécialisé dans les domaines des sciences du vivant, de l'agronomie et de l'environnement. Cet organisme collabore avec des organismes de recherche nationaux et internationaux, des partenaires industriels et des décideurs politiques. Ces collaborations visent à contribuer aux avancées scientifiques et aux solutions innovantes dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation et de la gestion environnementale (AgroParisTech,

2021). AgroParisTech s'implique au sein de l'UMR Territoire Clermont Auvergne, unité de recherche spécifiquement centrée sur l'étude des territoires, c'est-à-dire l'analyse des espaces géographiques et des dynamiques qui les caractérisent (*UMR Territoires*, 2024).

Le projet STar se concentre spécifiquement sur le Massif du Sancy, une région de moyenne montagne particulièrement sensible aux crises écologiques dues aux activités humaines telles que le changement climatique, la pollution et la fragmentation des habitats (Antonelli *et al.*, 2018). Situé au cœur du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (PNRVA), il n'est pas exempt de ces impacts.

À l'instar de nombreuses régions du globe, le Massif du Sancy subit les effets du réchauffement climatique, qui se manifestent par des modifications de ses écosystèmes. Ces changements incluent depuis trente ans, la modification des régimes de précipitations, l'augmentation des températures moyennes et la réduction des périodes de gel (Lochon, Leroy, 2021; Leroy *et al.*, 2023).

En parallèle, le territoire connaît des mutations profondes dans ses pratiques agricoles et touristiques. L'agriculture, autrefois centrée sur des pratiques traditionnelles, évolue pour s'adapter aux nouvelles conditions climatiques et économiques (Leroy *et al.*, 2023). Le tourisme, quant à lui, est en pleine mutation, avec la disparition de « l'or blanc » (*i.e.* la neige) et l'augmentation des pressions sur les ressources naturelles et les habitats locaux (Albert, Makhchoun, 2023; Aubert, 2023).

Ce projet vise à élaborer une méthode permettant, d'une part, de mieux caractériser les manifestations de l'anthropocène et, d'autre part, de relancer l'animation territoriale, où chaque acteur - habitant, élu, acteur socio-professionnel, chercheur - puisse s'emparer de ces enjeux grâce à un dispositif d'enquête. Ainsi, les objectifs du projet sont de mettre en avant une expertise parfois marginalisée, de favoriser des modalités démocratiques d'échange et de décision, de concevoir des dispositifs sentinelles avec les acteurs locaux et d'activer une communauté sentinelle à l'échelle du territoire. Pour cela, le projet utilise une approche systémique et intégrative, combinant les sciences sociales (géographie, économie, science de gestion, sociologie) et les sciences du vivant (écologie, agronomie).

Ceci a été effectué en collaborant avec plusieurs partenaires, dont le Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (PNRVA), la Réserve Naturelle Nationale Chastreix-Sancy (RNNCS), et le Centre Permanent d'Initiatives pour l'Environnement (CPIE) Clermont-Dômes. Ces partenaires sont essentiels pour co-construire les sentinelles territoriales et intégrer les connaissances locales et scientifiques dans le processus de recherche.

L'approche transdisciplinaire adoptée par le projet permet de combiner des perspectives académiques et pratiques pour mieux appréhender les défis contemporains et futurs. Ensemble, chercheurs et acteurs contribuent à l'élaboration d'une méthodologie pour identifier les « sentinelles territoriales » indiquant des ruptures causées par l'Anthropocène. En développant une compréhension approfondie des dynamiques territoriales et des réponses aux perturbations subit par ce territoire, le projet STar vise à aider à l'animation et à la sensibilisation les communautés.

C'est dans ce contexte que mon stage s'intègre. Il a pour but de **référencer et trier l'expertise écologique en lien avec le sujet et présente sur le territoire, mais également de recenser des sentinelles écologiques pertinentes en identifiant celles qui sont les plus adaptées aux spécificités du territoire**. Cela implique de recenser et d'organiser les connaissances existantes, en identifiant les acteurs locaux, les études précédentes et les données disponibles, ceci afin de construire une base de connaissances solide pour le projet STar.

De plus, ce stage doit permettre d'aider au ciblage d'un site d'étude et à la participation à la construction de la méthodologie du projet. Enfin, il vise à développer une méthodologie pour l'identification des signes de rupture écologique et des entités sentinelles du Massif du Sancy.

La problématique que nous abordons dans cette étude est la suivante : **Quelles sentinelles écologiques de l'Anthropocène peuvent être identifiées dans le Massif du Sancy en croisant littérature scientifique, données publiques, enquêtes de terrain et analyse cartographique ?**

Ce mémoire est donc structuré en quatre parties. Nous débuterons par un **état de l'art** approfondi sur des concepts clés relatifs au sujet et soutenus par des références scientifiques internationales. Ensuite, nous aborderons la **méthodologie** employée pour collecter les données (bibliographie et entretiens), construire de la base de données, ainsi qu'une échelle du « degré de sentinalité ». Nous exposerons les **résultats** obtenus, notamment la méthode construite chemin faisant du projet STar, la base de données développée, et la grille d'analyse de la sentinalité. Enfin, nous **discuterons** de la pertinence des résultats, évaluerons les limites de l'étude, et prendrons du recul pour réfléchir aux perspectives des outils produits.

1 Etat de l'art et concepts clés

Cette partie aborde les définitions des concepts clés de ce sujet tels que l'Anthropocène, les limites planétaires, les *early warning signals*, les ruptures écologiques, la résilience et le concept de sentinelles. Ces concepts permettent de clarifier les notions fondamentales dans le sujet étudié et garantir une base commune de compréhension.

1.1 Anthropocène

L'Anthropocène désigne une époque géologique récente au cours de laquelle les activités humaines ont un impact significatif sur la Terre et ses processus écologiques. Ce terme a été popularisé par le chimiste et prix Nobel Paul Crutzen dans les années 2000, soulignant que les activités humaines sont devenues une force géologique majeure, transformant le climat, la biodiversité, et les cycles biogéochimiques de la planète (Crutzen, 2002). Les indicateurs de l'Anthropocène incluent des augmentations rapides des concentrations de dioxyde de carbone et de méthane dans l'atmosphère, des changements drastiques dans l'utilisation des terres, et la perte accélérée de biodiversité.

Les scientifiques ont proposé divers marqueurs stratigraphiques, (éléments distincts, permettant de dater et d'identifier une période géologique précise dans les couches terrestres) pour cette époque, tels que les radionucléides des essais nucléaires, les plastiques, et les changements dans les sédiments marins. Cette notion révolutionnaire remet en question notre compréhension traditionnelle des forces qui modèlent notre planète en mettant en évidence le rôle prédominant de l'activité humaine dans les changements environnementaux à l'échelle globale (Crutzen, 2002).

Bien que l'impact du changement climatique provoqué par les activités humaines soit indiscutable et confirmé par le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2023), la reconnaissance de l'Anthropocène comme nouvelle époque géologique fait débat. Une partie des géologues considère que l'ère actuelle reste l'Holocène, débutée il y a 11 700 ans, à l'issue de la dernière ère glaciaire.

L'environnement relativement stable de la période interglaciaire actuelle, illustrée par l'augmentation et le plateau de l'indicateur $\delta^{18}\text{O}$ (visible en Figure 1) corrélé à l'augmentation de la température de l'air ambiant, a permis à l'agriculture et aux sociétés humaines de se développer et de prospérer. Cependant, le 5 mars 2024, *l'Anthropocène Working Group*, un comité de recherche interdisciplinaire dédié aux recherches sur l'Anthropocène, a décidé de ne pas officialiser cette nouvelle époque. Reconnaître l'Anthropocène supposerait que les changements géologiques récents induits par l'Homme ont été assez profonds pour marquer la fin de l'Holocène.

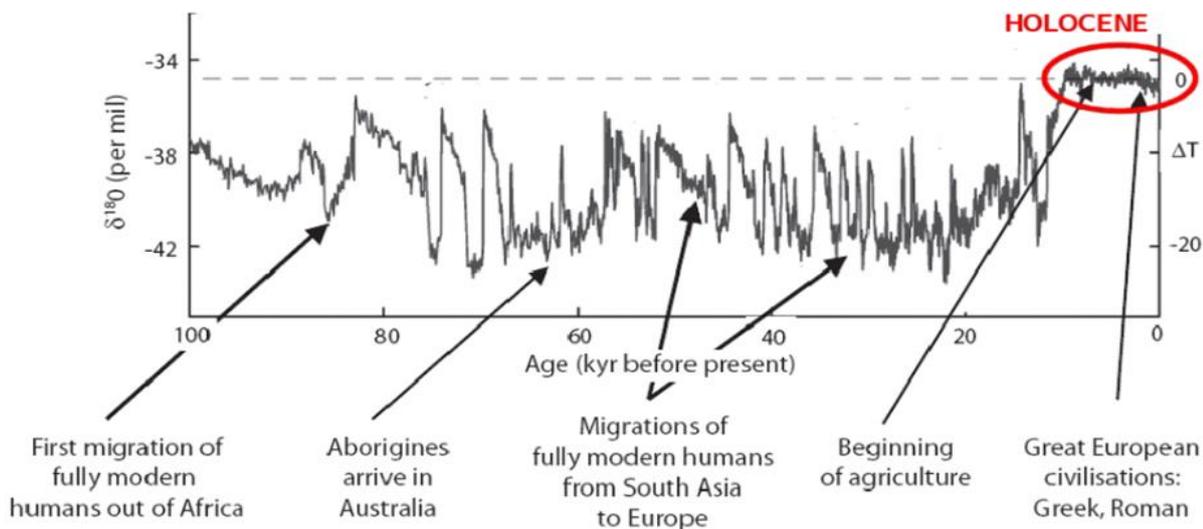


Figure 1: Le dernier cycle glaciaire de $\delta^{18}O$ (indicateur corrélé à la température de l'air ambiant) et certains événements historiques (Rockström et al., 2009)

Pour que l'Anthropocène soit défini au sens de nouvelle époque géologique, il doit remplir trois conditions : s'inscrire dans la durée, montrer des changements et des marqueurs qui produisent un signal global, et démontrer que ces changements s'étendent sur une longue période (Jouvancourt, 2024; Gillard, 2024). L'*Anthropocene Working Group*, a estimé que les arguments situant le début de l'Anthropocène au milieu du XX^{ème} siècle, en raison des retombées radioactives des bombes nucléaires, se basaient sur une période trop récente pour justifier cette classification (Zhong, 2024).

Pour être intégré dans l'échelle des temps géologiques, l'Anthropocène a été défini en répondant aux critères géologiques, plutôt qu'aux besoins des anthropologues et des autres disciplines, qui reconnaissent pourtant pleinement l'existence de l'Anthropocène. Certains scientifiques opposés à cette classification ont affirmé que ce choix ne devait pas être considéré comme une vérité immuable concernant l'état de la Terre (Zhong, 2024). Le concept d'Anthropocène a mis en lumière l'influence de l'homme sur la planète, mais n'offre pas de cadre précis pour mesurer ou gérer cette influence.

C'est pourquoi, les « limites planétaires » ont été développées pour pallier ce manque en fournissant des seuils mesurables qui aident à mieux comprendre et gérer les impacts anthropiques.

1.2 Limites planétaires

En 2009, Johan Rockström, expert en durabilité mondiale, a introduit le concept des limites planétaires. Ce cadre vise à comprendre le fonctionnement des systèmes de résilience de la Terre en définissant des seuils pour maintenir la stabilité des systèmes (Rockström et al., 2009).

Ces limites représentent des points critiques dans les systèmes environnementaux au-delà desquels l'impact humain pourrait provoquer des changements irréversibles et déstabilisant pour la planète (Zekri, 2023). Les neuf limites identifiées sont : le changement climatique, la perte de biodiversité, l'appauvrissement de la couche d'ozone, la perturbation des cycles biogéochimiques, le changement d'usage des sols, l'introduction de nouvelles substances, la consommation d'eau douce, l'acidification des océans et la concentration d'aérosols dans l'atmosphère.

La définition de limites planétaires vise à maintenir les conditions environnementales dans lesquelles les sociétés humaines peuvent prospérer (Richardson et al., 2023). Lors de leur définition, en 2009, l'humanité avait déjà franchi trois de ces limites Figure 2 :

- (i) Le changement climatique, une des principales limites planétaires, est défini par l'augmentation des températures mondiales en raison des émissions de gaz à effet de serre. La limite planétaire sur le changement climatique est fixée pour éviter des perturbations dangereuses dans le système terrestre. Elle est principalement définie par deux paramètres : la concentration de CO₂ atmosphérique et le forçage radiatif (quantification du déséquilibre entre l'énergie solaire entrante et l'énergie sortante en fonction des variations de Gaz à Effet de Serre (GES)). Au-delà des seuils, les risques de franchir des points de bascule irréversibles dans le climat augmentent fortement, menaçant ainsi la stabilité des systèmes écologiques et des sociétés humaines (Rockström *et al.*, 2009).
- (ii) la perte de biodiversité, qui fait référence à la diminution rapide du nombre et de la variété des espèces vivantes sur Terre (animales, végétales, micro-organismes, etc) et de leurs écosystèmes. Elle est définie par un taux d'extinction des espèces ne dépassant pas 10 extinctions par million d'espèces-années (E/MSY). Cette limite est cruciale car la biodiversité joue un rôle clé dans la résilience des écosystèmes face aux changements environnementaux. Depuis la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle, Le taux d'extinction des espèces est désormais 100 à 1000 fois plus élevé que les taux naturels, avec une estimation actuelle de plus de 100 extinctions par million d'espèces-années. (E/MSY) (Rockström *et al.*, 2009)
- (iii) La perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote (N) et du phosphore (P), éléments essentiels pour la vie sur Terre constitue la troisième limite (Rockström *et al.*, 2009). Les activités humaines ont profondément perturbé ces cycles naturels, conduisant à des déséquilibres environnementaux significatifs. L'azote est un élément crucial pour la croissance des plantes et la production de protéines.

Le phosphore est un autre nutriment essentiel pour les plantes et les animaux, impliqué dans la formation de l'ADN, des membranes cellulaires et des os (Rockström *et al.*, 2009). La perturbation du cycle de l'azote est principalement due à l'usage excessif d'engrais synthétiques, aux émissions de combustibles fossiles entraînant l'eutrophisation des milieux et des pollutions diverses (Rockström *et al.*, 2009).

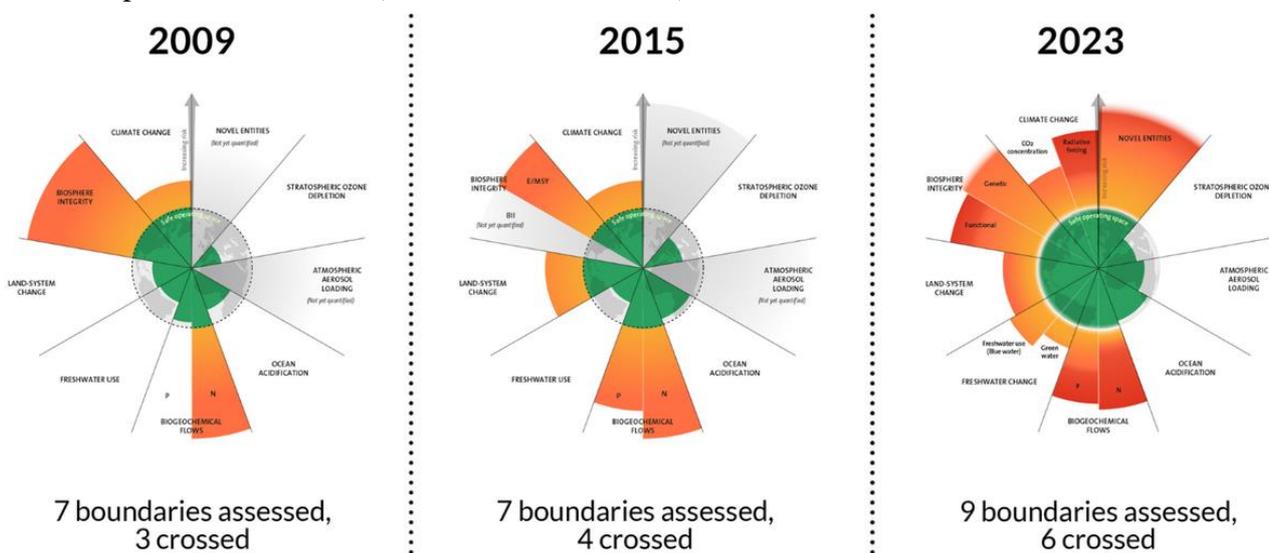


Figure 2: Évolution de la représentation des limites planétaires et leur dépassement (Azote for Stockholm Resilience Centre, 2012)

Les limites non dépassées, les limites dépassées et celles en cours d'analyse sont représentées respectivement en vert, orange et gris. Sur les 9 limites, 3 sont dépassées depuis 2009, 4 depuis 2015 et 6 depuis 2023.

Entre 2015 et 2023, trois autres limites ont été dépassées, portant le total à six sur les neuf limites visibles sur les deux graphiques (2015 ; 2023) de la Figure 2 (Richardson *et al.*, 2023). Tout comme l'azote, la limite de phosphore a été dépassée. La présence de phosphore dans les écosystèmes, due à l'utilisation d'engrais phosphatés, provoque une accumulation dans les sols. Cela, combiné à la déforestation et aux mauvaises pratiques agricoles, accentue l'érosion des sols et libère du phosphore dans les écosystèmes aquatiques.

Ce phénomène est lié à la limite planétaire du changement d'utilisation des sols, qui vise à prévenir les effets négatifs de l'expansion agricole sur l'environnement et la biodiversité. Actuellement, environ 12 % des terres émergées sont cultivées, et il est proposé de ne pas dépasser 15 % pour préserver les fonctions écologiques essentielles. La conversion des écosystèmes en terres agricoles affecte le climat, les cycles de l'eau et la biodiversité, avec des risques de changements irréversibles (Rockström *et al.*, 2009).

Enfin, la limite sur la surexploitation de l'eau douce vise à éviter les graves perturbations des écosystèmes. Elle se concentre sur deux aspects : la consommation d'eau bleue (eau douce disponible) et les impacts sur les flux d'eau verte (précipitations et évapotranspiration). Actuellement, l'utilisation de l'eau bleue approche les 4 000 km³ par an, ce qui augmente les risques de collapsus écologique et de perturbations climatiques.

La pression sur les ressources en eau croît dangereusement, nécessitant une gestion prudente pour éviter des impacts graves. Enfin, l'apparition de nouvelles entités chimiques et de matières plastiques dans l'environnement complique encore la situation, ajoutant une pression supplémentaire sur les écosystèmes déjà fragiles (Rockström *et al.*, 2009). Ce dépassement des capacités planétaires entraîne des impacts écologiques significatifs. Pour mieux comprendre ces transformations majeures, il est crucial d'identifier et d'évaluer les effets de ces changements sur les écosystèmes (Zekri, 2023; Richardson *et al.*, 2023).

Cette dégradation croissante des limites planétaires illustre la nécessité pressante de comprendre et d'anticiper les conséquences des perturbations environnementales. Dans ce contexte, le concept de rupture écologique devient central pour appréhender ces transformations majeures.

1.3 Ruptures écologiques

Le terme « rupture » dans le Dictionnaire de l'Académie Française, se réfère à une interruption significative d'une action, un système ou une situation. Celle-ci entraîne des changements brusques dans des conditions données (Dale et Beyeler, 2001). En général, une rupture peut être définie comme un événement ou un changement majeur qui rompt avec la continuité d'un état antérieur, introduisant de nouvelles dynamiques. Autrement dit, l'idée de « rupture » implique des changements dans les pratiques courantes en réponse à une nouvelle perturbation environnementale (Hasnaoui Amri, 2018). Ce concept est largement utilisé dans divers domaines, allant de la sociologie à l'économie, en passant par les sciences de l'environnement et la gestion des systèmes.

En écologie, une rupture se réfère principalement à la perturbation écologique, considérée comme un événement rare et destructeur (Rykiel, 1985). C'est un changement soudain et souvent irréversible dans un écosystème, généralement causé par des catastrophes naturelles ou des pressions anthropiques telles que la déforestation, la pollution, et le changement climatique. Les ruptures écologiques peuvent entraîner la perte de services écosystémiques essentiels et modifier radicalement la structure et le fonctionnement des écosystèmes ainsi que l'équilibre écologique. Elles nécessitent une compréhension approfondie pour être efficacement gérées (Rockström *et al.*, 2009).

Ainsi, si une rupture signale un bouleversement majeur, elle soulève également des questions sur la capacité des systèmes à anticiper ces chocs et à s'adapter aux nouvelles dynamiques qu'ils induisent. C'est dans ce cadre que le concept d'*early warning signals* prend toute son importance, permettant de détecter précocement les signaux de crise et de renforcer la capacité de résilience des systèmes écologiques face aux perturbations.

1.4 *Early warning signals*

Les signaux d'alerte précoce, ou *early warning signals*, sont des indicateurs utilisés pour prédire les changements significatifs et potentiellement catastrophiques dans des systèmes complexes avant qu'ils ne se produisent. Ces signaux incluent des changements dans la variabilité, l'autocorrélation ou la tendance des données avant qu'une transition majeure ne se produise (Scheffer *et al.*, 2001; Dakos *et al.*, 2019). Ces signaux permettent de détecter les signes avant-coureurs d'une transition majeure vers un régime dynamique différent.

En général, les signaux d'alerte précoce sont associés à un phénomène connu sous le nom de « ralentissement critique » expliqué par Dakos (2019), qui se manifeste par une diminution du taux de récupération d'un système après une perturbation à mesure qu'il approche d'un seuil critique ou d'une bifurcation (Kéfi *et al.*, 2013; Dakos *et al.*, 2019).

Les signaux d'alerte précoce génériques sont des outils précieux dans divers domaines scientifiques, allant des écosystèmes naturels aux marchés financiers ou aux systèmes climatiques. Ils peuvent indiquer si un seuil critique est en train d'être approché, offrant ainsi des opportunités pour des interventions préventives. Bien que la prédiction précise de ces points critiques soit extrêmement difficile, ces signaux fournissent des indications utiles pour surveiller la stabilité des systèmes et anticiper des transitions importantes (Scheffer *et al.*, 2001).

De plus, les changements des données écologiques peuvent indiquer des transitions imminentes. Les méthodes de détection précoce sont cruciales pour intervenir à temps et prévenir des ruptures écologiques irréversibles (Dakos *et al.*, 2019).

Les signaux d'alerte précoce offrent une précieuse opportunité d'anticiper les changements critiques dans les systèmes complexes en détectant des changements subtils de transition imminente. Cependant, la détection de ces signaux nécessite souvent des points de références concrets et sensibles dans l'environnement, capables de réagir rapidement aux ruptures naissantes. C'est ici que la notion de sentinelle entre en jeu.

1.5 Sentinelle

La notion de sentinelle, dérivée du latin « *sentire* » signifiant ressentir, provient du domaine militaire et désigne un soldat posté en avant-garde pour alerter en cas de danger imminent. Ainsi, une sentinelle se caractérise par sa capacité à percevoir des menaces et à prévenir des crises potentielles (Keck, Lakoff, 2013). Historiquement, le concept de sentinelle est illustré par l'exemple des canaris utilisés dans les mines au XIX^{ème} siècle. Ces oiseaux, particulièrement sensibles à la qualité de l'air, manifestaient des signes d'asphyxie avant les mineurs, les avertissant ainsi de la présence de gaz dangereux tels que le monoxyde de carbone (Amiard, Amiard-Triquet, 2008; Toma, 2009). En écologie, une sentinelle est définie comme une espèce capable d'alerter sur des dysfonctionnements ou des déséquilibres dans un milieu, signalant ainsi des dangers potentiels ou des changements radicaux (Toma, 2009). Les sciences sociales les situent souvent sur les « lignes de crête de l'alerte », soulignant leur rôle crucial dans la détection précoce des perturbations (Bonnet, Landivar, 2024).

1.5.1 Sentinelles pour évaluer les ruptures écologiques de l'Anthropocène

Les sentinelles écologiques sont des espèces ou des écosystèmes utilisés pour détecter les premiers signes de dégradation environnementale. Elles jouent un rôle dans la surveillance des changements écologiques et dans l'alerte précoce des risques pour la biodiversité et les écosystèmes (Amiard, Amiard-Triquet, 2008). Contrairement aux bioindicateurs, qui fournissent des informations quantitatives sur la qualité environnementale, les sentinelles alertent sur des changements ou des perturbations spécifiques dans l'environnement.

Par exemple, certains oiseaux anthropophiles, tels que le martinet noir (*Apus apus*) ou l'effraie des clochers (*Tyto alba*), servent de sentinelles en mesurant l'impact de l'urbanisation sur la biodiversité (Godet, 2017).

Les changements climatiques forcent les espèces à s'adapter, entraînant des modifications dans les périodes de reproduction ou de floraison. Par exemple, la présence accrue de fourmis dans les habitats urbains ou d'espèces végétales comme *Armeria arenaria* dans des zones touristiques peut servir de sentinelles des impacts du tourisme et de l'urbanisation (Youssef *et al.*, 2009). De même, le phytoplancton, dont le cycle de vie est court, réagit rapidement aux variations environnementales, ce qui en fait une sentinelle efficace pour surveiller les effets de la pollution organique et du changement climatique dans les océans (Schweibold, 2022).

En outre, les sentinelles sont caractérisées par leur capacité à détecter ces signaux de manière précoce et leur situation géographique qui les place en première ligne des changements liés à l'Anthropocène. L'utilisation des sentinelles écologiques permet de simplifier les études environnementales en se concentrant sur des espèces clés qui reflètent les changements dans l'écosystème. Cependant, il est crucial de choisir ces sentinelles avec soin, en tenant compte des spécificités des niches écologiques et des habitats pour garantir des évaluations précises. Par exemple, deux espèces occupant des niches écologiques différentes ne peuvent pas être interchangeables comme sentinelles d'un même écosystème (Carignan, Villard, 2001).

1.5.2 Résilience et sensibilité des sentinelles écologiques : un système d'*early warning signals*

La sensibilité se réfère à la capacité d'une entité à réagir ou à changer en réponse à des variations de son environnement (Dale, Beyeler, 2001; Zhang *et al.*, 2022). Cette capacité peut être influencée par divers facteurs, notamment les caractéristiques intrinsèques de l'entité, les propriétés de son environnement et les interactions entre les deux.

La sensibilité écologique, en particulier, fait référence à la réactivité des espèces ou des écosystèmes aux changements environnementaux. La sensibilité écologique désigne la capacité des espèces ou des écosystèmes à réagir aux changements environnementaux. Elle inclut à la fois la réactivité immédiate face à des perturbations (comme des variations climatiques, la pollution ou des changements d'usage des sols) et leur vulnérabilité, c'est-à-dire leur susceptibilité à subir des dommages ou des altérations.

Cependant, la sensibilité ne se limite pas à la vulnérabilité. Elle englobe aussi la capacité de l'écosystème à s'adapter ou à résister à ces changements, ce qui permet de distinguer la réactivité (rapidité et intensité de la réponse) de la vulnérabilité (degré d'exposition au risque). Les entités sensibles réagissent rapidement aux variations de leur environnement, ce qui en fait des indicateurs précieux des perturbations écologiques (Dale, Beyeler, 2001).

Les écosystèmes ayant une haute sensibilité sont souvent plus vulnérables aux perturbations et peuvent subir des changements rapides et irréversibles sous l'effet des pressions environnementales.

Comprendre cette sensibilité est essentiel pour maintenir la santé et la fonctionnalité des écosystèmes face aux changements globaux (Bergengren *et al.*, 2011). Ces écosystèmes sensibles deviennent ainsi des zones d'émergence de sentinelles écologiques, offrant une perspective précieuse pour identifier les points de basculement des écosystèmes, quantifier les impacts humains et évaluer l'efficacité des efforts de conservation ou de gestion (Hazen *et al.*, 2024).

Les sentinelles écologiques sont des outils précieux pour les systèmes d'alerte précoce (*early warning signals*) au niveau global, permettant de détecter les signes avant-coureurs de dégradations environnementales avant qu'elles ne deviennent irréversibles. Les variations des populations de sentinelles peuvent précéder des changements écologiques majeurs, fournissant ainsi des indicateurs essentiels pour la gestion et la conservation des écosystèmes. Les travaux de Carpenter et Brock (2006) ont démontré comment ces signaux d'alerte précoces peuvent être utilisés pour prédire des transitions écologiques abruptes.

Pour être efficaces, les sentinelles écologiques doivent être sensibles aux pressions exercées par les activités humaines tout en ayant une sensibilité limitée et documentée aux variations naturelles (Dale, Beyeler, 2001). Une sentinelle écologique idéale réagit de manière spécifique et sensible à un stress particulier, servant ainsi d'alerte précoce à une dégradation de l'intégrité du système (Dale, Beyeler, 2001). Ainsi, les sentinelles écologiques jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des impacts de l'Anthropocène sur les écosystèmes (Hazen *et al.*, 2024). Leurs sensibilités aux perturbations environnementales en font des outils précieux pour les systèmes d'alerte précoce, contribuant à la prévention des dégradations écologiques.

Parallèlement, la résilience écologique se définit comme la capacité d'un écosystème à absorber des perturbations et à se réorganiser tout en conservant ses fonctions essentielles, sa structure et son identité. Elle permet aux écosystèmes de résister aux stress et de se rétablir après des perturbations, qu'il s'agisse d'événements climatiques extrêmes ou d'interventions humaines (Gunderson, 2000).

Les travaux de Carpenter et Brock (2006) ont montré que les écosystèmes peuvent évoluer entre différents "domaines de stabilité alternatifs", où des états différents coexistent sous les mêmes conditions environnementales. Ces chercheurs ont également mis en évidence l'importance des signaux d'alerte précoces, tels que l'augmentation de la variance et de l'autocorrélation dans les données écologiques, qui peuvent indiquer des transitions critiques imminentes.

En combinant la sensibilité et la résilience dans l'étude des sentinelles écologiques, il est possible d'anticiper et de gérer les réponses des écosystèmes face aux perturbations croissantes, permettant ainsi de prévenir des transitions abruptes et potentiellement destructrices et de protéger la biodiversité.

1.5.3 La sentinelle dans le projet STar

Pour répondre au contexte et à la problématique développée précédemment, le projet STar adopte une approche innovante en se caractérisant par sa pluridisciplinarité et l'intégration des différentes conceptions des sentinelles. D'une part, le projet réunit des experts de divers domaines, allant des sciences sociales aux sciences de la vie, afin de favoriser une compréhension globale des phénomènes étudiés. D'autre part, il allie recherche et animation territoriale pour une meilleure prise en compte des sensibilités locales. Cette démarche transdisciplinaire permet d'explorer les différentes acceptions des sentinelles et de promouvoir l'innovation à travers une collaboration étroite entre les différentes disciplines.

Dans le cadre du projet, les sentinelles écologiques peuvent être des animaux, des écosystèmes, des milieux ect capables d'identifier des signaux avant-coureurs de changements environnementaux (dont climatiques). Leur rôle est de sensibiliser le grand public aux menaces potentielles en les rendant visibles. Selon Blanchon (2020), professeur en géographie, les sentinelles permettent d'identifier les menaces pour les écosystèmes ou la santé humaine, entraînant ainsi une prise de conscience plus large des enjeux actuels.

Les sentinelles écologiques peuvent également être mobilisées au sein de **dispositifs sentinelles**, afin de surveiller, alerter et réagir face aux perturbations. Ils comprennent plusieurs éléments clés : un système d'alerte pour la détection précoce des anomalies, un système décisionnaire rapide, et un système pour définir les stratégies d'adaptation. Selon Keck et Lakoff (2013), ces dispositifs permettent de relier la production de preuves scientifiques aux processus décisionnels et stratégiques pour faire face aux manifestations de l'Anthropocène. Ils varient en fonction des contextes mais partagent l'objectif commun de maintenir une vigilance accrue face aux perturbations environnementales et de coordonner les réponses appropriées.

Selon une proposition théorique qui s'appuie sur l'enquête pragmatiste, une **organisation sentinelle** est un dispositif externe conçu pour augmenter la vigilance d'une organisation, lui permettant de se décharger de certaines responsabilités tout en poursuivant ses activités en toute sécurité (Bonnet, Landivar, 2024). Ce processus implique une enquête collective où la perception du problème, appelée "trouble" dans le cadre du projet, est identifiée et analysée.

Une communauté d'enquête est ensuite formée pour examiner et répondre à ce trouble. Ce processus est soumis à un arbitrage stratégique pour décider des actions appropriées à mener face aux menaces détectées. Cette approche permet de structurer une réponse organisée et coordonnée face aux défis environnementaux (Keck, Lakoff, 2013).

En lien avec les organisations, les **communautés sentinelles**, présentes dans les territoires sentinelles, jouent également un rôle stratégique dans l'évaluation et la réponse aux changements environnementaux. Ces **collectifs** utilisent des dispositifs de surveillance pour combler le fossé entre la diversité des perceptions des menaces et les réponses nécessaires. Elles sont instrumentalisées pour réduire les écarts entre les perceptions du trouble et les réponses apportées, en intégrant à la fois des connaissances locales et des stratégies de gestion (Bonnet, Landivar, 2024). Cette mobilisation communautaire est essentielle pour une gestion efficace des impacts environnementaux.

Enfin, certains territoires, en raison de leur situation géographique particulière et de leur dépendance à des ressources naturelles spécifiques, sont particulièrement exposés aux impacts environnementaux. Ces **territoires sentinelles** se trouvent aux avant-postes des changements écologiques, les confrontant plus intensément et plus tôt que d'autres régions¹. Blanchon et al. (2020) décrivent ces territoires comme étant habités par des communautés vivant les premiers effets des perturbations écologiques.

Ils se distinguent par trois caractéristiques principales : une position géographique sensible, la présence de dispositifs d'observation pour la surveillance des changements, et l'association à une communauté engagée dans l'évaluation et la gestion des impacts (Bonnet, Landivar, 2024). La construction d'un territoire sentinelle implique donc un processus en plusieurs étapes, allant de la

¹ Référence de la réponse à l'appel à projet de l'Agence Nationale de la Recherche du projet Sentinelles territoriales : vers une méthode de caractérisation et d'animation territoriale pour se saisir des enjeux de l'anthropocène, K.Berthomé & E. Bonnet

détection précoce des menaces à la mobilisation communautaire pour répondre aux changements (Bonnet, Landivar, 2024).

1.6 Problématisation

Ainsi, l'Anthropocène, caractérisé par des changements environnementaux sans précédent dus à l'activité humaine, nécessite une approche fine pour identifier les signaux de perturbations écologiques. Les limites planétaires et les ruptures écologiques soulignent l'urgence de détecter ces perturbations avant qu'elles ne deviennent irréversibles. Les sentinelles écologiques, en tant qu'indicateurs sensibles aux changements, offrent une voie prometteuse pour surveiller ces impacts. Cependant, leur identification dans des contextes géographiques spécifiques, comme le Massif du Sancy, requiert une méthodologie pluridisciplinaire.

En combinant littérature scientifique, données publiques, enquêtes de terrain et analyses cartographiques, l'objectif est d'identifier les sentinelles écologiques qui rendent compte au mieux des effets de l'Anthropocène dans cette région. Ainsi, la question centrale de cette recherche est : **Quelles sentinelles écologiques de l'Anthropocène peuvent être identifiées dans le Massif du Sancy en croisant littérature scientifique, données publiques, enquêtes de terrain et analyse cartographique ?**

Ce mémoire abordera tout d'abord la méthodologie employée pour collecter les données ainsi que la construction d'une base de données sentinelles et de critères d'importance de la sentinelle. Les résultats obtenus seront ensuite exposés notamment la base de données développée, et l'échelle de critère de degré d'importance de la sentinelle. Enfin, la discussion développera la pertinence des résultats et évaluera les limites de l'étude, afin de prendre du recul pour réfléchir aux perspectives des outils produits.

2 Méthodes

Afin d'identifier les sentinelles écologiques représentatives de l'Anthropocène dans le Massif du Sancy, la méthodologie a été développée en parallèle de la construction de la méthodologie du projet STar. L'illustration des différentes étapes de cette méthode est présentée dans le schéma en Figure 3.

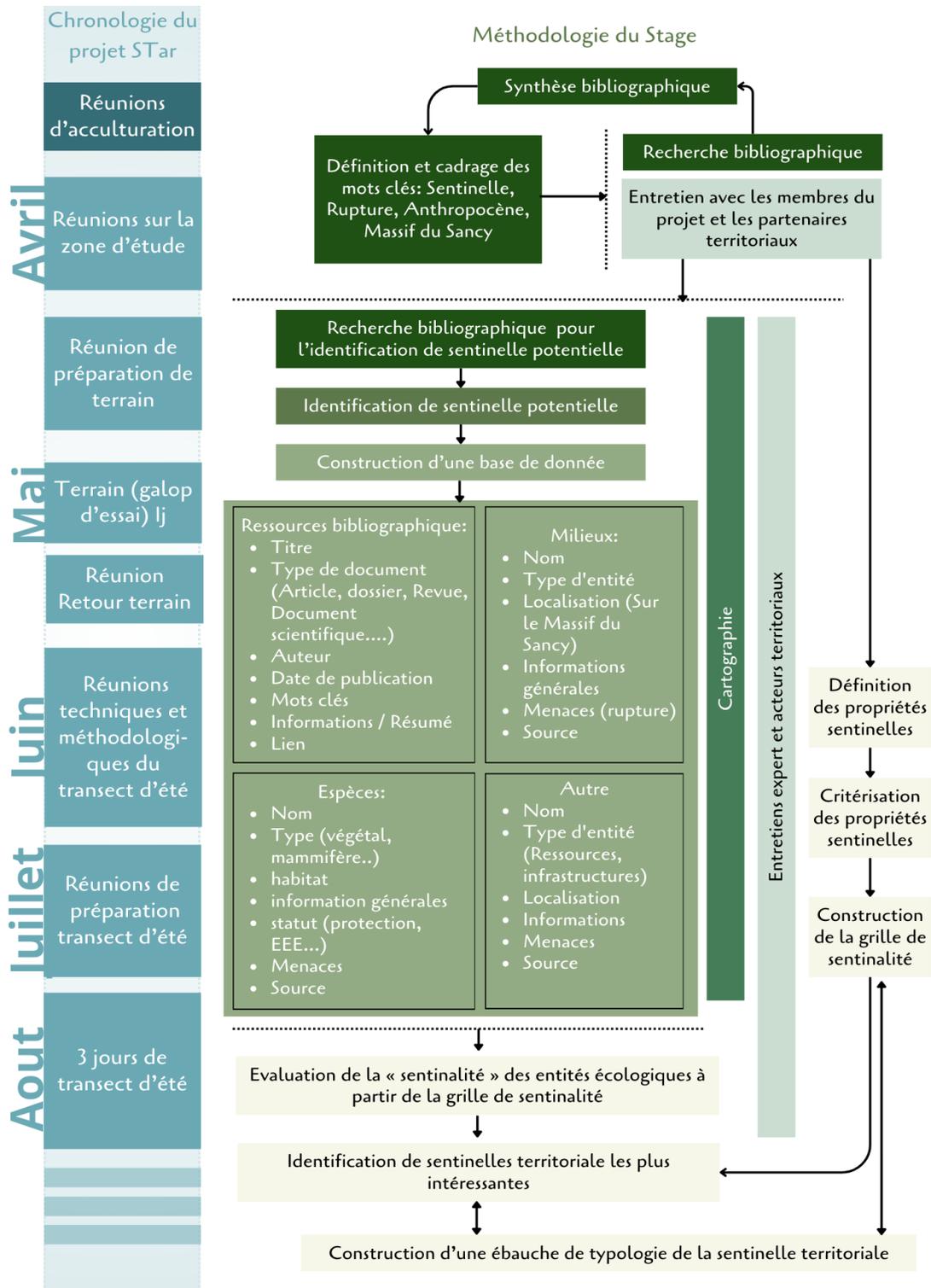


Figure 3: Schéma de la méthodologie de recherche

2.1 Recherche bibliographique

Ce projet a débuté par une série de réunions de réflexion et d'acculturation, axées sur les concepts clés. Dès le début de ce stage, il a été indispensable de réaliser des recherches bibliographiques détaillées pour affiner les critères de sélection des sentinelles. Ces recherches se sont concentrées sur des mots-clés spécifiques tels que « sentinelles », « Anthropocène », « rupture écologique », « bioindicateurs », etc. Au cours de ce processus, un questionnement approfondi a émergé concernant la distinction entre les concepts de sentinelles et de bioindicateurs dans le domaine de l'écologie.

Ce questionnement a conduit à la rédaction d'une synthèse bibliographique intitulée « La contribution des concepts de sentinelle et de bioindicateur pour caractériser les ruptures écologiques de l'Anthropocène », qui a alimenté les réflexions du projet Star et a joué un rôle central dans la définition du contexte de ce mémoire.

Ensuite, il a été essentiel d'établir un état des lieux approfondi des connaissances présentes sur le territoire. Pour cela, la recherche bibliographique a été structurée en deux volets distincts.

Le premier volet consistait en une recherche générale sur le Massif du Sancy, qui visait à comprendre les caractéristiques écologiques du massif et les perturbations anthropiques qui y sont présentes. Les termes de recherche utilisés étaient « Massif du Sancy », « perturbation anthropique sur le Massif du Sancy » et « rupture écologique ». L'objectif principal de cette phase était de rassembler des informations clés sur les impacts des activités humaines sur les écosystèmes du massif et d'identifier les zones d'intérêt potentielles pour le projet.

Le deuxième volet de la recherche était plus spécifique et a porté sur les sentinelles écologiques du Massif du Sancy. Cette recherche était concentrée sur des termes comme « sentinelles écologiques », « suivi écologique », « espèce menacée Sancy », et « sentinelle ». L'objectif était de repérer les sentinelles potentielles, c'est-à-dire les espèces capables de signaler des ruptures ou des changements écologiques importants dus aux activités humaines. Cette phase a permis de recenser les dispositifs de suivi déjà en place ou à développer sur le massif.

Les outils utilisés pour ces recherches incluaient divers moteurs de recherche et bases de données scientifiques tels que Google Scholar, Hal, Cairn, ResearchGate, Scopus, et ScienceDirect.

Des sites spécialisés appartenant à des acteurs territoriaux en écologie, comme ceux du Conservatoire des Espaces Naturels (CEN), du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (PNRVA), de la Réserve Naturelle Nationale Chastreix-Sancy (RNNCS) et du Conservatoire Botanique National (CBN), ont également été consultés. Ces plateformes ont permis d'accéder à une grande diversité de sources d'information, allant des articles de recherche ou de journaux, des études scientifiques, des rapports d'experts, ainsi que des vidéos et des supports pédagogiques pertinents pour une compréhension approfondie des enjeux écologiques spécifiques au Massif du Sancy.

Toutes les ressources collectées ont été compilées et organisées à l'aide de Zotero, un outil de gestion bibliographique permettant de structurer efficacement les informations et de faciliter leur utilisation dans le cadre du projet.

2.2 Cartographie pour la définition des zones d'intérêt dans le Massif du Sancy

En parallèle de cette recherche bibliographique, des représentations cartographiques du Massif du Sancy ont été réalisées pour identifier et visualiser les différentes zones d'intérêt. Ces cartes ont servi pour plusieurs finalités. Le premier usage pour caractériser la zone d'étude qu'est le Massif du Sancy (présentée dans la partie 2.3) et planifier les futures étapes du projet, notamment pour identifier des zones d'intérêt écologique avec potentiellement des espèces ou des lieux intéressants pour la recherche de sentinelles. Certaines cartes ont notamment été réalisées afin d'outiller les entretiens mais aussi d'arpentage test du terrain durant l'été. Le second usage des cartes était pour le repérage des potentiels transects sur le terrain, c'est-à-dire de techniques d'analyse en tracés, le long desquels seront étudiées les sentinelles écologiques.

Les cartes ont été réalisées grâce au logiciel QGIS version 3.36.1. Certaines cartes ont été faites grâce aux services WFS (*Web Feature Service*) et WMS (*Web Map Service*) de QGIS pour enrichir l'analyse géospatiale. Le WFS m'a permis d'accéder et de manipuler des données géographiques en temps réel en interrogeant directement des serveurs distants pour obtenir des couches vectorielles. En parallèle, le WMS m'a offert la possibilité de visualiser des cartes raster provenant de serveurs externes, ce qui m'a permis d'intégrer des fonds de carte à jour dans mon projet QGIS. L'utilisation combinée de ces services, des données IGN et des données du PNRVA a considérablement amélioré la précision et l'efficacité de mes analyses géographiques.

Transect

L'une des méthodes que le projet STar vise à mettre en place est le transect. Le choix d'utiliser un transect dans le cadre du projet, se justifie par la nécessité de couvrir un vaste espace composé de gradients environnementaux et potentiellement sociaux. Le projet Star a opté pour cette méthode afin d'intégrer des perspectives interdisciplinaires, combinant études cartographiques, sociologiques, écologiques et photographiques pour mieux répondre aux attentes des différents acteurs du territoire.

Le transect offre ainsi une vue détaillée des composantes géographiques et écologiques à travers l'espace. En géographie, il permet de représenter les dynamiques spatiales à travers une coupe ou un profil (Tixier, 2018; Pousin *et al.*, 2016). En écologie, il sert à échantillonner des gradients environnementaux ou anthropiques. Adapté à divers contextes, le transect aide à comprendre les interactions entre activités humaines et écologie, et favorise une approche sensible et collaborative (Hill, 2005).

2.3 Caractérisation du territoire d'étude

L'outil principal de cette recherche est le terrain d'étude. Une présentation détaillée a été réalisée grâce à la recherche bibliographique ainsi qu'à l'aide de plusieurs cartes du territoire.

Situé en grande partie au cœur de la région naturelle (terme utilisé par le PNR) des Monts Dore, et aux limites du Cézallier et du plateau de l'Artense, au sein du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (Figure 4), le Massif du Sancy est une région d'une richesse naturelle exceptionnelle. Ce PNR est le plus grand de France. Il s'étend sur des paysages volcaniques uniques et abrite une biodiversité remarquable. Le Massif du Sancy offre une mosaïque de paysages et d'écosystèmes qui favorisent la coexistence d'une faune et d'une flore d'une grande diversité (PNRVA, 2024).

Les altitudes variées, allant des vallées profondes aux crêtes escarpées, créent des microclimats distincts qui hébergent des espèces montagnardes et subalpines. La faune et la flore de la région sont protégées, avec de nombreuses espèces rares et endémiques, notamment dans les Réserves Naturelles Nationales (RNN) de Chaufeufour et de Chastreix-Sancy, située autour du point culminant du Massif Central, le Puy du Sancy à 1886 mètres d'altitude (Figure 4).

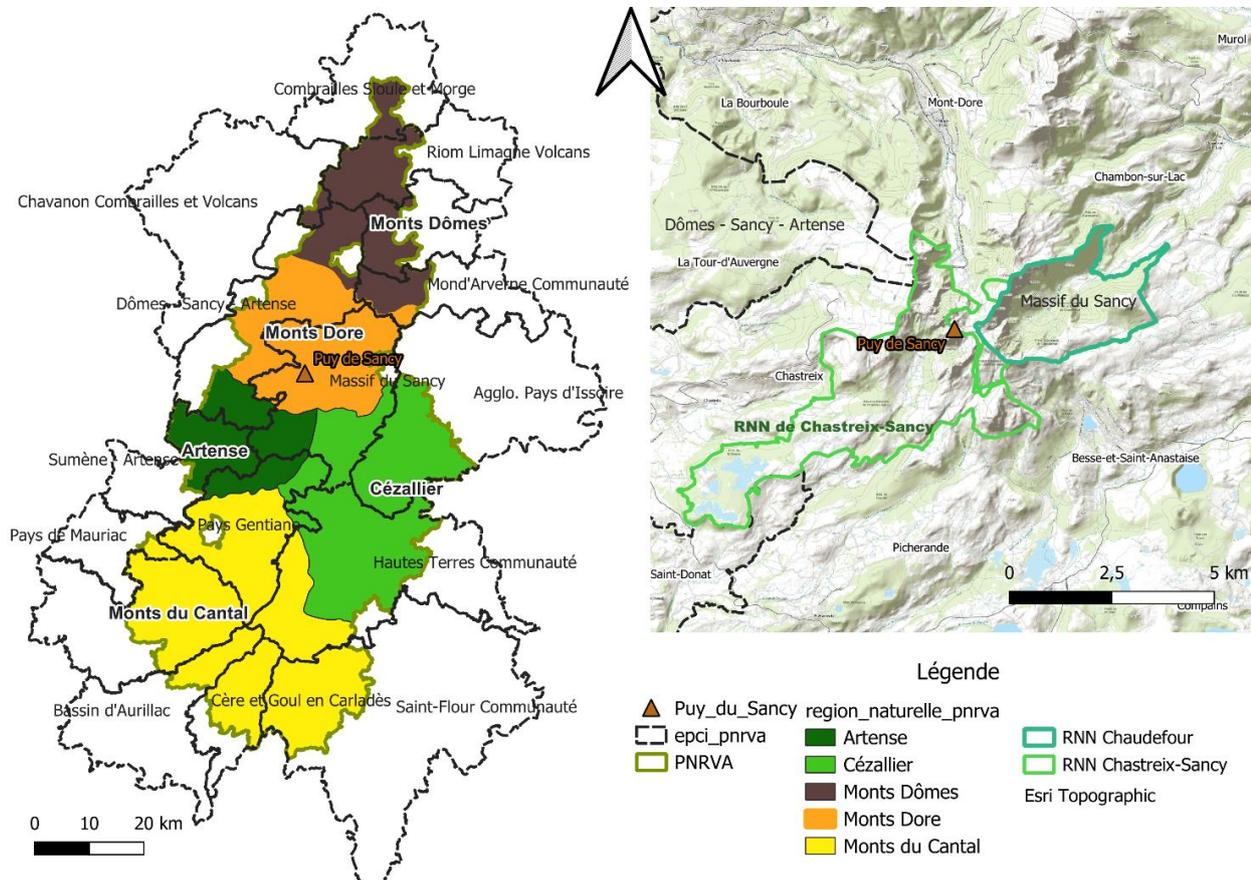


Figure 4: Représentation cartographique du terrain d'étude au cœur du Massif du Sancy au sein du PNRVA ainsi que du relief : les limites du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne (au sein du PNRVA) et ses régions naturelles, les limites des deux Réserves Naturelles Nationales (RNN) et la topographie relief du massif.

Le territoire du Sancy se distingue par diverses formes de séparations, tant géographiques qu'administratives. D'une part, comme le montre la Figure 4, le Massif du Sancy recouvre administrativement deux communautés de communes (CC) : la CC Massif du Sancy à l'est et Dôme-Sancy-Artense à l'ouest. La zone d'intérêt étudiée dans le projet STar s'étend du nord au sud sur une petite portion du sud des Monts-Dômes (Puy de Dôme) et la partie nord de l'Artense, du Cézallier (Figure 4).

D'autre part, deux versants se font face, avec le Puy de Sancy en position centrale, dominant le paysage. Le versant sud accueille plus à l'est la ville de Besse ainsi que le domaine skiable de Super-Besse. Il est moins escarpé et se caractérise par un climat plus sec, à l'exception notable de la vallée de Chaufeufour (RNN) positionnée au sud-est. Il s'étend ensuite jusqu'aux plateaux basaltiques du Cézallier, composés de prairies d'estives, de tourbières et de lacs.

Le versant ouest, est structuré autour de la vallée de la Haute Dordogne et la Réserve Naturelle Nationale de Chastreix-Sancy (RNN Chastreix-Sancy). Plus au nord se trouvent la ville du Mont-

Dore avec sa station de ski et la ville thermale de La Bourboule, ainsi que la station de ski de Chastreix-Sancy (à l'ouest). Ce secteur se distingue par ses reliefs imposants, avec des pics acérés et des vallées profondes. Entre ces deux versants se situe une ligne de crêtes qui forme une barrière naturelle (Massif du Sancy, 2024a). Que ce soit en hiver ou en été, il est nécessaire de franchir les cols pour passer d'un versant à l'autre.

L'agriculture est marquée par des pratiques traditionnelles. Les producteurs locaux jouent un rôle essentiel dans la préservation des paysages et la biodiversité, en particulier à travers un système d'élevage extensif et la production de fromages locaux et labellisé comme le Saint-Nectaire (AOP), qui est un véritable emblème de la région (Annexe 1) mais aussi l'AOP Cantal, Salers, Bleu d'Auvergne et Fourme d'Ambert. L'initiative « Origine Sancy » valorise ces productions locales, en encourageant les circuits courts et en mettant en avant les artisans du territoire (Massif du Sancy, 2024b).

Le tourisme quant à lui est fortement orienté vers des activités de pleine nature, telles que la randonnée, le cyclotourisme et les sports d'hiver, qui exploitent pleinement le cadre naturel du massif (Massif du Sancy, 2024b).

Ainsi, le Massif du Sancy est un territoire où coexistent nature, agriculture, et tourisme, avec une attention particulière portée à la durabilité et à la préservation des écosystèmes.

2.4 Entretiens exploratoires avec partenaires et acteurs territoriaux

Parallèlement aux recherches bibliographiques, plusieurs entretiens exploratoires ont été menés avec les membres du projet et des partenaires territoriaux afin d'identifier des experts et des personnes ressources susceptibles d'apporter des éclairages supplémentaires sur le sujet des sentinelles écologiques.

Les différents contacts ont été pris par mail pour organiser des rendez-vous, chaque entretien durant environ deux heures. Ces entretiens, réalisés en équipe, ont permis d'échanger librement sur les thématiques centrales du projet, d'identifier des pistes de recherche supplémentaires, des contacts ou des sentinelles potentielles. Les informations issues des entretiens ont été retranscrites ou notées dans des comptes rendus détaillés pour assurer un suivi des données récoltées. La liste de ces entretiens est présentée en Annexe 2.

Ces entretiens ont ensuite donné lieu à d'autres entretiens, par effet « boule de neige », d'une part ceux nommés « entretien en laboratoire » avec les contacts ressources recommandés par les membres du projet. Ces entretiens se sont déroulés avec des experts du territoire du Massif du Sancy, ou d'une discipline reliée à celui-ci, la plupart étant des scientifiques spécialisés.

D'autre part, un « galop d'essai » mené sur le terrain dans le Massif du Sancy a permis de réaliser des entretiens avec des acteurs du territoire. Ces entretiens ont permis d'affiner et de lever d'autres pistes de sentinelles potentielles mais aussi d'améliorer la connaissance sur leur pertinence sur le territoire. Ces informations ont ensuite été intégrées dans une base de données, en complément des résultats des recherches bibliographiques. Enfin, un arpentage test a été initié en différents groupes lors de l'été 2024 afin d'échanger avec d'avantage d'utilisateurs du territoire, et confronter les informations récoltées dans la base de données, mais aussi la compléter.

2.5 Construction d'une base de données sentinelles

Afin de réaliser une compilation des données récoltées par la recherche bibliographique et aux entretiens, une base de données des sentinelles a été construite pour regrouper l'ensemble des informations recueillies, facilitant ainsi l'accès aux données au fur et à mesure de l'avancement du projet STar.

Construite sur Excel, la base de données est constituée de plusieurs feuilles, chacune composée d'un tableur dédié à une catégorie spécifique afin de faciliter l'organisation et la consultation des données.

La première feuille est consacrée aux ressources bibliographiques. Cette section regroupe toutes les références documentaires pertinentes pour l'étude. Chaque ressource est décrite en détail à travers plusieurs colonnes.

Tout d'abord le titre du document est renseigné, suivi du type de document, qu'il s'agisse d'un article, d'un dossier, d'une revue ou encore d'un document scientifique. Le nom du ou des auteurs est ensuite précisé, ainsi que la date de publication, afin de situer l'information dans son contexte temporel. Les mots clés associés permettent une recherche thématique plus rapide, tandis qu'une colonne est dédiée à un résumé ou à des informations générales sur le contenu du document. Enfin, un lien hypertexte est renseigné menant au document en ligne, facilitant ainsi son accès.

La deuxième feuille se concentre sur les espèces potentiellement sentinelles identifiées. Cette partie de la base est destinée à décrire en profondeur chaque espèce répertoriée. Le nom de l'espèce scientifique et commun, est suivi par une colonne qui précise son type, par exemple, s'il s'agit d'un végétal, d'un mammifère, ou d'un autre type d'organisme pour faciliter la compréhension et l'identification par n'importe quel membre du projet.

L'habitat naturel de l'espèce est également détaillé, permettant de comprendre où elle se développe. Des informations générales viennent ensuite fournir un portrait plus complet de l'espèce, incluant ses caractéristiques et son comportement.

Une attention particulière est accordée au statut de l'espèce, qui peut indiquer si elle est protégée ou si elle est considérée comme Espèce Exotique Envahissante (EEE). Les menaces auxquelles l'espèce est confrontée sont également listées, comme la perte de son habitat ou d'autres dangers environnementaux.

Les menaces renseignées sont celles dues à l'impact de l'homme sur les territoires. La source de ces informations est enfin mentionnée grâce à un menu déroulant récupérant les documents renseignés sur la page des ressources documentaire, garantissant la fiabilité et la rapidité d'accès des données présentées.

La troisième feuille est dédiée aux milieux naturels du Massif du Sancy. Cette section permet de répertorier et de décrire les différents types de milieux présents dans cette région. Chaque milieu est identifié par un nom spécifique, tel qu'un type de prairie ou de forêt et son type d'entité est précisé pour en faciliter la classification.

La localisation géographique, indique où se trouve ce milieu sur le Massif du Sancy. Des informations générales sont ensuite fournies pour décrire le milieu en question, mettant en lumière ses caractéristiques écologiques principales. La colonne des menaces identifie les dangers spécifiques qui pèsent sur ces milieux, qu'il s'agisse de ruptures d'écosystème ou de dégradations dues à des activités humaines. Comme pour les autres sections, la source des informations est mentionnée pour garantir la véracité des données. Enfin la feuille « Autre » de la base regroupe des éléments variés

qui ne rentrent pas dans les autres catégories, mais qui restent pertinentes comme sentinelle. Chaque entrée commence par le nom de l'entité, suivi de son type (ressources ou infrastructures).

La localisation où se trouve l'entité dans le Massif du Sancy, et la colonne informations offre un résumé de ses caractéristiques ou de son état. Les menaces potentielles qui pèsent sur l'entité sont également indiquées, et la source des informations est mentionnée pour garantir la fiabilité des données.

En somme, cette base de données structurée sur plusieurs pages offre une vue d'ensemble détaillée et organisée des ressources bibliographiques, des espèces, et des milieux naturels étudiés comme sentinelle potentielle tout en permettant une consultation et une analyse efficaces des informations recueillies.

2.6 Etude du degré de « sentinalité »

Afin de déterminer quelles potentielles sentinelles possèdent les meilleures capacités pour détecter et rendre compte des changements environnementaux de l'Anthropocène, et ainsi s'avérer les plus pertinentes pour le projet STar, nous avons évalué chacune d'elles selon divers critères et propriétés.

Pour ce faire, une grille de "sentinalité" a été établie, basée sur les propriétés sentinelles définies par les critères identifiés dans le cadre de cette étude à partir des définitions données par la littérature. La capacité de chaque sentinelle potentielle à signaler des changements et à alerter est évaluée en fonction de ces critères.

Dans la base de données, toutes les potentielles sentinelles ont été regroupées dans une feuille finale de la base de données, spécialement conçu pour analyser de chaque sentinelle. Les cellules sont alors remplies par « OUI » ou « NON » en fonction des propriétés remplies par chaque sentinelle.

Les propriétés sentinelles prises en compte, ainsi que leurs critères sont les détaillés ici :

- **Entités sentinelles** : elles se distinguent par leur aptitude à détecter précocement les signaux de changements environnementaux ou climatiques. Elles jouent un rôle essentiel dans l'identification des menaces pour les écosystèmes ou la santé humaine, en particulier dans les zones géographiques sensibles (Keck, 2020; Blanchon *et al.*, 2020).
- **Dispositifs techniques** : ces dispositifs sont capables de mesurer et d'enregistrer ponctuellement ou en continu des paramètres environnementaux spécifiques. Ils peuvent aussi fournir des données en temps réel, ce qui permet une analyse rapide et précise des conditions observées (Bonnet, Landivar, 2024).
- **Dispositifs sentinelles** : ils fonctionnent comme des systèmes d'alertes, détectant les anomalies et facilitant la prise de décisions rapides face aux urgences. Ces dispositifs relient les preuves scientifiques fournis par les dispositifs techniques aux processus décisionnels, contribuant ainsi à l'élaboration de stratégies d'adaptation par une communauté (Keck et Lakoff, 2013).
- **Communautés sentinelles** : Groupement de personnes utilisant des dispositifs de surveillance pour observer les changements. Ces communautés intègrent des connaissances locales et des stratégies de gestion, jouant un rôle stratégique dans la gestion des impacts environnementaux en comblant les écarts entre perceptions et réponses aux menaces (Keck et Lakoff, 2013).

- **Organisations sentinelles** : elles se caractérisent par un processus d'enquête collective destiné à identifier et analyser les troubles. Elles forment des communautés d'enquête pour répondre aux menaces et coordonnent les réponses stratégiques face aux perturbations (Bonnet, Landivar, 2024).
- **Postes sentinelles** : ces localisations stratégiques offrent une grande visibilité sur les changements environnementaux. Leur accessibilité au public est cruciale pour sensibiliser aux dangers imminents, renforcée par leur importance historique et géographique (Keck, 2020).
- **Territoires sentinelles** : situés aux avant-postes des changements écologiques, ces territoires sont dotés de dispositifs d'observation et sont associés à des communautés engagées dans l'évaluation et la gestion des impacts. Leur développement repose sur la détection des menaces, la sensibilisation publique, et la mobilisation communautaire, transformant les changements en problèmes sociaux reconnus par les institutions (Blanchon *et al.*, 2020; Bonnet, Landivar, 2024).
- La **sentinelle territoriale** est un concept développé dans le cadre du projet., Elle est ici définie comme une entité sentinelle qui sert de repère aux changements d'un territoire spécifique pris en charge par une communauté, ancrée dans un territoire spécifique, visible à des postes spécifiques et dont les changements sont captés par un dispositif sentinelle.
 Cette entité joue un rôle important dans la redéfinition et la redynamisation d'un espace commun, tout en facilitant la connexion entre les sciences et les sociétés. La sentinelle territoriale assure une surveillance environnementale tout en renforçant les interactions scientifiques et sociales. Sa fonction est étroitement liée aux conditions locales et peut être influencée par les dynamiques territoriales, mais elle n'exige pas nécessairement une organisation, un dispositif ou des postes sentinelles.

Ces propriétés n'ont pas toutes les mêmes niveaux de sentinalité, par exemple, un dispositif sentinelle ne peut exister que dans le cas où les critères de sentinalité « basique » sont respectés, c'est-à-dire que l'entité considérée est une sentinelle, qui possède un dispositif technique et une communauté. Ainsi, les organisations sentinelles utilisent les dispositifs sentinelles et sont positionnés dans des postes sentinelles ou des territoires sentinelles. Les postes sentinelles sont positionnés dans un territoire sentinelle et une sentinelle est considérée comme territoriale uniquement si elle est rattachée à un territoire et qu'elle répond aux critères basiques de la sentinelle évoqués plus haut.

La méthodologie décrite précédemment a servi de cadre pour la collecte et l'analyse des données. Nous allons maintenant présenter les résultats de cette analyse.

3 Résultats

Cette section présente les résultats, en commençant par l'identification des ruptures écologiques et des zones d'intérêt, suivie de la caractérisation des sentinelles écologiques. L'évaluation de la « sentinalité » des entités écologiques est ensuite détaillée à travers divers exemples.

3.1 Identification des ruptures écologiques et des zones d'intérêt écologique du territoire par la cartographie

Dans le cadre de ce projet, des cartes ont été élaborées afin d'offrir une vue d'ensemble des caractéristiques géographiques de la zone d'étude. Ces cartes constituent une base essentielle pour comprendre le contexte spatial des recherches menées, en identifiant des potentiels secteurs pour le projet d'intérêt. Les cartes ont non seulement contribué à l'élaboration de la base de données, mais elles ont également nourri les réflexions et les orientations des recherches ultérieures du projet STar. Certaines de ces cartes sont présentées en Annexes 3 à 7.

Le territoire comprend plusieurs espaces écologiques notables, dont les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de types 1 et 2, ainsi que les Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO).

Bien que ces zones ne bénéficient d'aucune protection juridique directe, elles sont définies sur la base d'inventaires scientifiques, ce qui témoigne de leur importance écologique. Les ZNIEFF de type 1 identifient des zones à grande richesse patrimoniale, caractérisées par des milieux rares ou représentatifs et des espèces protégées, généralement sur des superficies limitées. Les ZNIEFF de type 2, en revanche, couvrent des ensembles naturels homogènes reconnus pour leur richesse écologique, souvent plus étendus, et pouvant inclure des ZNIEFF de type 1 (DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 2021). Les ZICO protègent les espèces d'oiseaux menacées, préservent les habitats, et servent d'indicateurs de biodiversité. Elles sont des réservoirs de biodiversité, jouent un rôle dans la recherche scientifique, et favorisent l'éducation et le tourisme. L'analyse cartographique du territoire autour du Massif du Sancy présentée en Figure 5 a révélé la présence de quatre ZICO (Annexe 3), ainsi que de quatre ZNIEFF de type II (couvrant environ 187 000 hectares) et de quatre-vingt-huit ZNIEFF de type I (représentant environ 24 245 hectares) (Annexe 4). Ces dernières incluent plusieurs lacs, puys, tourbières, vallons, bois. Par ailleurs, la zone d'étude comprend onze sites Natura 2000 (Annexe 5) qui visent à protéger des habitats, et des espèces représentant la biodiversité locale, en recoupant partiellement les zones ZNIEFF et ZICO.

Ces zones sont des indicateurs de la richesse écologique des milieux étudiés, mais également des espaces potentiels de rupture écologique, dues à des pressions anthropiques ou climatiques. L'identification de ces zones a permis d'établir une liste des espèces et des milieux protégés par ces classements, servant ainsi à détecter de potentielles sentinelles écologiques face aux ruptures.

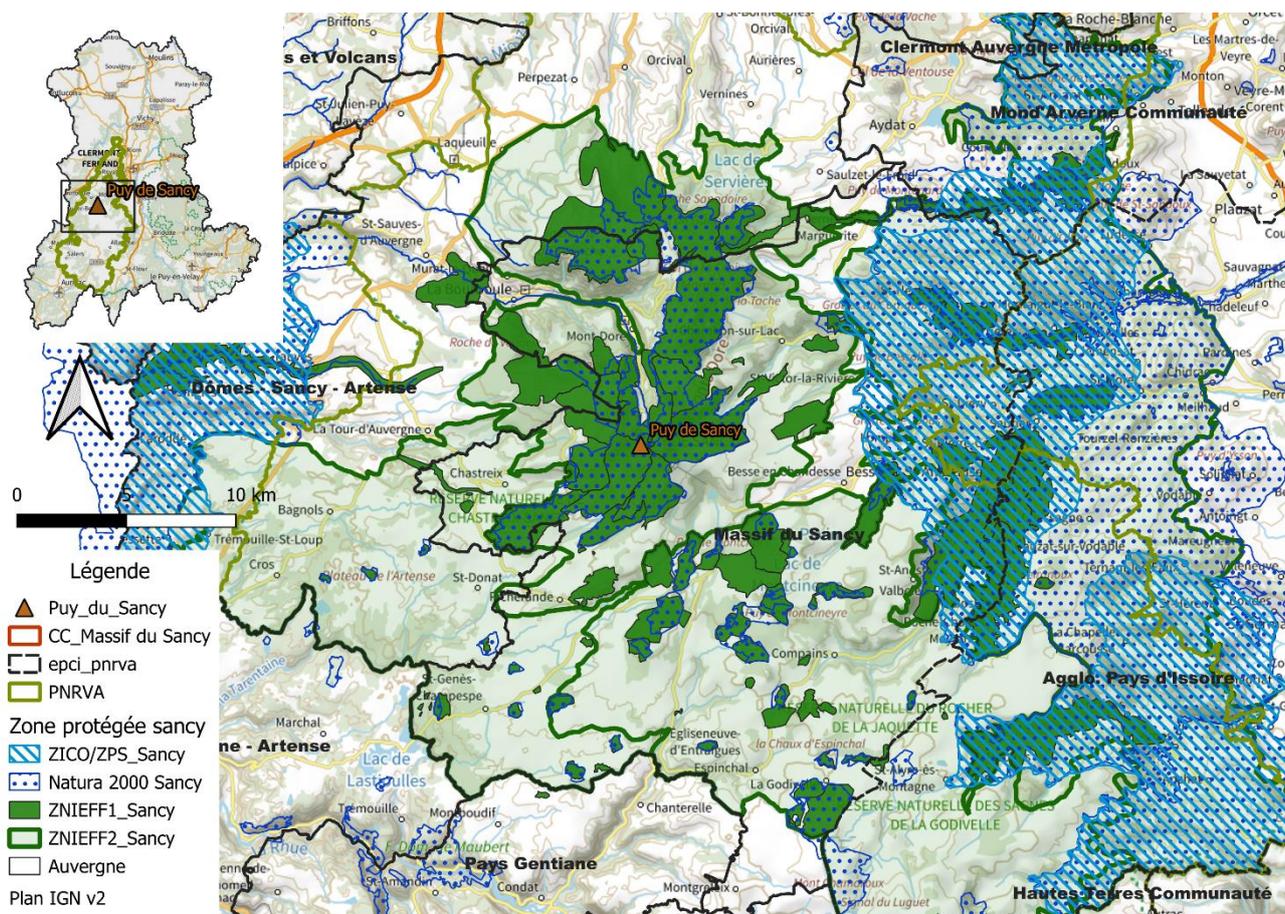


Figure 5: Représentation cartographique des zones d'intérêts écologiques sur le Massif du Sancy

D'autres cartes ont été créées, notamment une représentation du réseau hydrologique du territoire, qui met en évidence l'importance de l'eau, un enjeu central dans la région pour sa quantité mais plus particulièrement pertinent pour sa qualité à la suite d'un entretien avec un technicien de la Fédération de la pêche (Annexe 6). De plus, une carte des réseaux de transports et les villes a été réalisée afin d'identifier les zones de rupture anthropique (Annexe 7).

La recherche de milieux et espèces justifiant la présence de ces différentes zones de protection ou d'inventaire, a permis en parallèle des entretiens réalisés avec les experts et les acteurs territoriaux et des recherches bibliographiques, d'établir la base de données de potentielles sentinelles. Cette base de données sert désormais de fondation pour la grille de sentinalité, qui permet de sélectionner les sentinelles les plus pertinentes pour le projet STAR.

3.2 Identification et caractérisation de sentinelle écologique à partir de la base de données

La recherche de milieux et espèces justifiant la présence de ces différentes zones de protection ou d'inventaire, a permis par recouplement avec les entretiens réalisés avec les experts, les acteurs territoriaux et des recherches bibliographiques, d'établir la base de données de potentielles sentinelles.

La base de données comporte plusieurs feuilles de calcul. La feuille des ressources documentaires (Annexe 8), a été enrichie de 60 références, offrant ainsi des informations complémentaires pour l'identification des sentinelles potentielles recensées dans les autres feuilles. Les résultats seront abordés en suivant la structure de la base de données.

3.2.1 Les espèces

Les espèces compilées dans la première feuille regroupent la majorité des sentinelles potentielles identifiées au cours de cette étude. Grâce à des recherches bibliographiques approfondies et à des entretiens ciblés, plus de 94 espèces ont été considérées comme des sentinelles potentielles (Annexe 9).

Afin de faciliter l'analyse de la base de données, les espèces sont qualifiées par leur groupe taxonomique, leur habitat et leur statut (protection, ravageur...). D'autres données renseignées, telles que les menaces ou ruptures auxquelles les espèces sont confrontées, ainsi que des informations complémentaires, ont été ajoutées pour enrichir et rendre les données plus complètes.

3.2.1.1 Caractérisations des espèces selon les taxons

Le premier facteur regroupe les espèces en différentes catégories taxonomiques pour faciliter la compréhension par des personnes non initiées aux noms latins ou n'ayant pas de connaissances en écologie. Ces précisions ne se situent pas toutes au même niveau taxonomique, mais elles permettent un tri simplifié et une compréhension plus fluide pour les personnes non spécialisées.

Ces critères incluent les mammifères (hors chiroptères), les végétaux, les insectes (hors papillons et odonates), les reptiles, les amphibiens, les papillons, les chiroptères (chauves-souris), les odonates (libellules), les poissons, les crustacés et les oiseaux.

Le tableau 1 regroupe le nombre d'espèces de chaque groupe taxonomique renseigné dans la base de données. Une certaine disparité peut être identifiée entre ces catégories, avec des variations significatives dans le nombre d'espèces identifiées, sur les 94 au total. Les végétaux sont le groupe le plus diversifié, avec 23 espèces recensées. Ils sont suivis par les oiseaux, avec 16 espèces, puis par les mammifères et les amphibiens, avec respectivement 11 et 9 espèces.

Tableau 1: Représentation du nombre d'espèces renseignés par groupes

	Nombre d'espèce
Végétaux	23
Oiseaux	16
Mammifères	11
Amphibien	9
Chiroptère	8
Reptiles	7
Papillons	6
Insectes	5
Poissons	4
Odonates	3
Crustacés	1
Bactéries	1
Total	94

3.2.1.2 Caractérisations des espèces selon l'habitat

Les espèces de potentielles sentinelles sont ensuite caractérisées selon différents types d'habitat, chacun présentant des caractéristiques écologiques spécifiques. D'après les recherches sur chaque espèce les critères suivants ont été établis représentant les différents types d'habitats : les « grottes, forêts et bâtiments » ; les « landes avec petits arbustes » ; les « landes humides et tourbière, nardraie » ; les « prairies sèches » ; les « prairies et forêts » ; les « prairies, zone agricole » ; les « zones humides et cours d'eau » ; les « zones montagnardes et les falaises » et enfin les « zones montagnardes et subalpines ». La répartition du nombre d'espèces par taxons en fonction de leur habitat est illustrée dans la Figure 6.

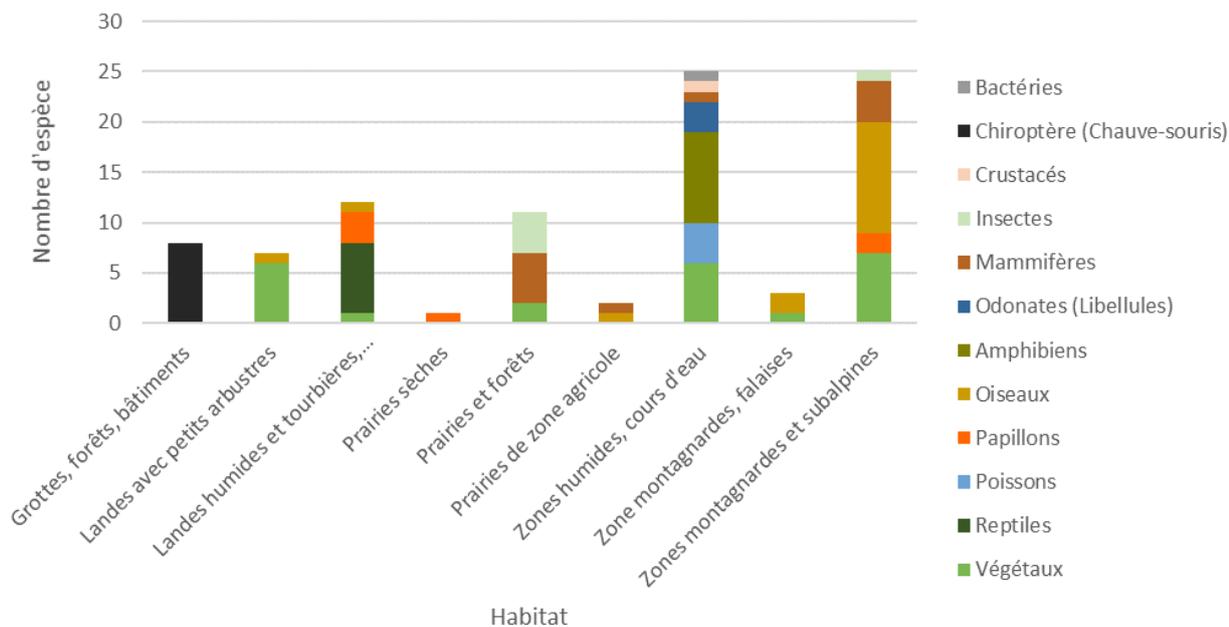


Figure 6: Représentation graphique de la répartition du nombre d'espèces sentinelle par taxons en fonction de leur habitat

L'analyse des données de la base révèle des variations significatives dans la présence de sentinelle selon les types d'habitats observés. Les zones humides et cours d'eau se démarquent par leur richesse spécifique, accueillant une présence notable de végétaux (6 sentinelles potentielles), une grande diversité d'amphibiens (9 sentinelles potentielles) et de poissons (4 sentinelles potentielles), mais aussi la prise en compte d'une bactérie potentiellement sentinelle.

Les zones montagnardes et subalpines montrent également une biodiversité importante avec 25 espèces concernées, dominées par les odonates (11 sentinelles potentielles) et les végétaux (7 sentinelles potentielles), tout en incluant quelques mammifères (4 sentinelles potentielles). Ces habitats sont cruciaux pour certaines espèces spécifiques.

Les landes humides et tourbières se révèlent essentielles pour les amphibiens (7 sentinelles potentielles) et les papillons (3 sentinelles potentielles). Enfin les grottes, forêts et bâtiments sont caractérisées par leur fonction spécifique pour les chauves-souris, avec 8 observations exclusivement de ce groupe. Les prairies sèches, quant à elles, accueillent une diversité de papillons.

3.2.1.3 *Caractérisations des espèces selon le statut de l'espèce*

Le troisième facteur pris en compte pour qualifier les espèces potentiellement sentinelles est le statut de l'espèce, c'est-à-dire l'existence de statuts de protection qui reflètent leur importance écologique et les menaces auxquelles elles sont exposées.

Certaines espèces potentiellement sentinelle de la base de données, bénéficient d'une protection à l'échelle mondiale et/ou européenne (48 espèces), visant à préserver leur habitat et leur survie à ces niveaux. Les espèces bénéficiaires de protection nationale (65 espèces) et celles sous protection régionale (AuRA, 43 espèces) sont particulièrement valorisées pour leur rareté ou leur importance locale. Les espèces patrimoniales (47 espèces) sont également mises en avant pour leur valeur historique ou culturelle.

Il est important de noter que certaines espèces cumulent plusieurs statuts de protection, entre les échelle européenne, nationale, régionale (AuRA) et patrimoniale, ce qui renforce leur niveau de conservation.

Enfin, la base relève aussi des espèces exotiques envahissantes (EEE, 7 espèces) qui posent des risques écologiques majeurs en perturbant les écosystèmes locaux. Il peut s'agir d'espèces prolifiques (2 espèces) c'est-à-dire qui sont reconnues pour leur capacité à se reproduire rapidement, ce qui peut influencer leur gestion. Enfin, les espèces susceptibles d'occasionner des dégâts (ESOD, 2 espèces : marte des pins et renard roux) qui nécessitent une gestion prudente pour minimiser les impacts négatifs potentiels.

3.2.2 *Les milieux ressources et infrastructures*

Le second type de potentielles sentinelles concerne les milieux (Annexe 10), ainsi que les ressources et infrastructures, regroupés dans trois feuilles distinctes (Annexe 11). Ainsi, onze milieux ont été déterminés comme susceptibles de servir de sentinelles, comme l'étage subalpin, les hêtraie-sapinières ou encore les plantations d'épicéas. Ces milieux pourront être mis en relation avec les habitats des espèces précédemment mentionnées, dans le but de définir une sentinelle territoriale qui regrouperait à la fois les espèces et les milieux, offrant ainsi une échelle d'analyse différente.

La feuille consacrée aux ressources comprend quatre entités, dont trois sont des ressources (l'eau douce, l'herbe, le manteau neigeux). Enfin, le dernier type de sentinelle est une infrastructure environnementale à savoir les sentiers de randonnées. Les milieux, les ressources et les infrastructures sont caractérisés par plusieurs facteurs : leur localisation approximative sur le terrain d'étude, les menaces auxquelles ils sont confrontés, des informations complémentaires sur leur état et leur importance écologique.

Enfin, le choix a été fait de relever des entités sentinelles parmi les ressources et les infrastructures. Les ressources, telles que l'eau et l'herbe, sont considérées comme des apports écologiques essentiels du territoire, par exemple pour le pâturage, et sont également soumises à des ruptures dues aux changements environnementaux et aux pressions humaines.

De même, les infrastructures, comme les sentiers de randonnée, ont été identifiées comme des sentinelles « écologique » potentielles pertinente pour le territoire. Ces sentiers, qui se trouvent au cœur des activités touristique de plein air pour les touristes, font face à des transformations liées aux modifications climatiques et à l'intensification de leur fréquentation. Leur état et leur évolution constituent des marqueurs précieux des changements affectant les milieux naturels et les pratiques humaines associées.

3.2.3 Analyse des ruptures et menaces

Au sein de la base de données, chaque entité a été reliée à des menaces ou des ruptures en fonction des écrits ou des études, il a été possible de relever des éléments communs. Les milieux naturels et les espèces qui les habitent ont été relevés dans la base de données, sont confrontés à une série de menaces principalement induites par le changement climatique (10 entités) et les activités humaines.

Les menaces plus citées dans la base de données sont : (i) l'augmentation des températures et la diminution de la neige qui affectent particulièrement les milieux montagnards, entraînant la perte de biodiversité et mettant en péril les espèces locales et endémiques. (ii) La banalisation des habitats (7 entités), (iii) l'arrivée d'espèces montagnardes dans l'espace subalpins (4 entités), et (iv) l'augmentation de l'activité humaine (7 entités), comme le tourisme et le pâturage, contribuent au changement et à la dégradation des écosystèmes. Les milieux subissent également des impacts locaux tels que l'invasion par les espèces et la fragilité du sol liée aux travaux ou au piétinement.

Les espèces citées dans la base sont affectées par : la destruction de leurs habitats (38 entités) due à la déforestation, l'urbanisation, et le drainage des zones humides, ce qui provoque une fragmentation des habitats et limite les ressources disponibles. Elles sont aussi affectées par la pollution des eaux (13 entités) et les modifications des régimes hydriques (10 entités) qui altèrent la qualité des milieux aquatiques et les conditions de vie des espèces qui en dépendent.

Le changement climatique (23 entités), exacerbé par les activités humaines, entraîne des modifications environnementales telles que des variations de température et de couverture neigeuse, affectant les espèces spécialisées. Les perturbations humaines directes (24 entités), telles que le dérangement, la chasse illégale, et l'empoisonnement, ainsi que les maladies et les pesticides, ajoutent aux pressions sur ces espèces.

La compétition avec les espèces envahissantes (11 entités) et les modifications des écosystèmes locaux sont également des conséquences des interventions humaines, amplifiant les effets du changement climatique et des perturbations environnementales. Ces milieux continuent de se détériorer, perdant leur dynamique naturelle et leur diversité spécifique. L'impact humain reste donc un facteur majeur dans les ruptures écologiques qui affectent à la fois les milieux et les espèces.

Ainsi, la base de données élaborée permet de recenser les potentielles sentinelles écologiques, offrant ainsi un outil précieux pour suivre les ruptures auxquelles elles font faces. La structure de la base de données a été conçue pour faciliter son utilisation et garantir la traçabilité des informations, chaque entité étant directement liée à une source. Cette base de données contribue à l'élaboration d'une méthodologie de recherche, conformément aux objectifs du projet STar.

3.3 Evaluation de la « sentinalité » des entités écologiques à partir de la grille de sentinalité

Une grille de « sentinalité » a été développée (Annexe 12), afin d'identifier les sentinelles les plus pertinentes pour le projet STar. Cette démarche a conduit à la création des critères de sentinalité, relié aux différentes propriétés sentinelles précédemment explicitées : entité sentinelle, dispositif techniques, communauté sentinelle, dispositif sentinelle, organisation sentinelle, poste sentinelle et territoire sentinelle, qui reposent sur les concepts discutés au sein du projet STar, tirés de la bibliographie existante. Des critères sont ici proposés pour compléter la grille de propriétés, avec la notion de sentinelle territoriale.

Ainsi, chaque potentielle sentinelle est évaluée grâce à cette grille. La grille n'a pas pour but de hiérarchiser les potentielles sentinelles, mais de donner une indication sur leur niveau de sentinalité. Des exemples de la grille sont visibles dans le Tableau 2.

Tableau 2: Analyse des propriétés de sentinalité de quelques potentielles sentinelles

Entité	Taxonomie / Type	Potentielle sentinelle	Entité Sentinelle	Dispositif technique	Dispositif Sentinelle	Poste Sentinelle	Communauté Sentinelle	Territoire Sentinelle	Sentinelles Territoriales
Cyanobactérie	Bactéries	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Scolyte	Insectes	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Campagnol terrestre	Mammifères	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Chamois	Mammifères	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON
Chat forestier	Mammifères	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI	NON	NON
Loup	Mammifères	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON
Loutre d'europe	Mammifères	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
Mouflons	Mammifères	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON
Apollon arverne	Papillons	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NON
Vipère péliade	Reptiles	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NON
Gentiane Jaune	Végétaux	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
Jasione crista	Végétaux	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NON
Genêts	Végétaux	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON
Myrtille sauvage	Végétaux	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NON
Étage subalpin	Milieu	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
Eau	Ressources	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

L'objectif de ce tableau est de présenter un processus méthodologique pour sélectionner les entités les plus prometteuses en vue de créer une « super sentinelle » territoriale. Les critères attribués à chaque propriété permettent d'améliorer le niveau de sentinalité de l'espèce ou entité, vers un niveau de sentinelle territoriale de l'Anthropocène, en alignement avec le projet Star qui cherche à appliquer ce concept au territoire du Sancy.

Quelques exemples du Tableau 2 sont présentés par la suite pour clarifier les critères. Les exemples sélectionnés illustrent des entités sentinelles à différents niveaux de sentinalité, allant des moins représentatifs aux plus représentatifs de la sentinelle territoriale. Leur pertinence directe pour le territoire du Massif du Sancy, leur caractère emblématique et leur rôle dans la surveillance des changements environnementaux sont mis en avant. De plus, ils illustrent chacun un milieu ou un enjeu fort du Massif du Sancy.

Les chats forestiers, bien qu'importants en tant que sentinelles écologiques pour les milieux forestiers, ont une sentinalité territoriale limitée dans cette région. En revanche, les proliférations de campagnols terrestres, qui jouent un rôle significatif dans l'agriculture, et les cyanobactéries, impliquées dans l'usage des zones de baignade, ont été retenues pour leur capacité à refléter les impacts des pratiques agricoles et des variations climatiques sur les prairies et les milieux aquatiques.

La ressource en eau douce, représentative de l'ensemble des milieux écologiques, est également essentielle en raison de son lien direct avec la neige, tandis que l'étage subalpin, un milieu spécifique de montagne, est essentiel pour la diversité des usages tels que les randonnées et les estives. Ces exemples mettent en lumière la pertinence des sentinelles dans la surveillance des changements environnementaux et des enjeux majeurs du Massif du Sancy.

Les représentations schématiques de la sentinalité des Figures 7, 8 et 9, utilisées dans les exemples suivants sont une proposition d'organisation des critères sentinelles les uns par rapport aux autres. Dans chaque schéma, le texte en gris représente les propriétés non remplies par les sentinelles étudiées.

3.3.1 L'exemple du chat forestier

Le chat forestier, un mammifère discret et emblématique des milieux forestiers, se distingue comme une entité sentinelle potentielle dans la surveillance écologique. Cette espèce, récemment observée dans la RNNCS, a été identifiée comme une sentinelle pertinente pour plusieurs raisons. Les propriétés du chat forestier sont schématisées dans la Figure 7. En tant qu'entité sentinelle, le chat forestier remplit toutes les fonctions nécessaires pour surveiller les changements environnementaux.

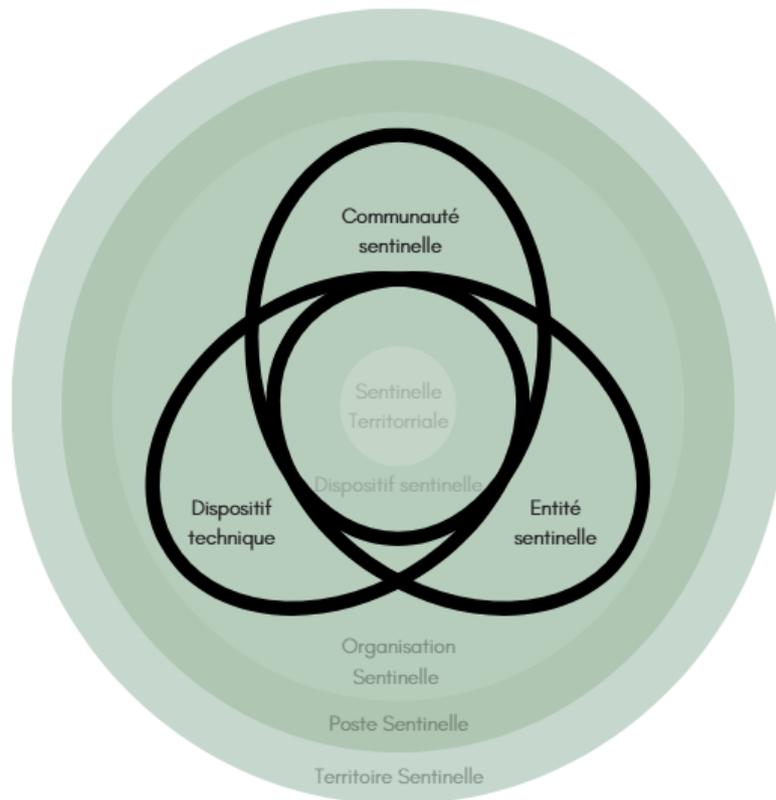


Figure 7: Représentation schématique de la sentinalité du chat forestier

Dans chaque schéma, le texte en gris représente les propriétés non remplies par les sentinelles étudiées.

De plus il est particulièrement touché par la fragmentation des milieux. Son statut de prédateur au sommet et sa dépendance à un habitat forestier de qualité font de lui un indicateur précieux de la continuité des écosystèmes forestiers, soulignant ainsi l'importance de sa protection et de sa conservation dans les zones qu'il habite (Genet, Franco, 2023).

Le chat forestier est suivi par des dispositifs techniques permettant de suivre ses comportements, grâce à des technologies telles que les suivis de populations et les pièges photographiques. Sa surveillance est assurée par une communauté sentinelle qui inclut des chercheurs et des gestionnaires de la faune, même si aucun dispositif ou organisation sentinelle spécifique n'a encore été établi pour cette espèce. De plus, il ne dispose pas d'un poste ou d'un territoire sentinelle dans le Sancy, ayant été

observé de manière anecdotique ces dernières années. Par conséquent, il ne peut pas être considéré comme une sentinelle territoriale à ce stade, car il ne remplit pas l'ensemble des critères de sentinalité et ne possède pas toutes les propriétés requises (Figure 7).

3.3.2 L'exemple de l'étage subalpin du Massif du Sancy

Dans le Massif du Sancy, l'étage subalpin est un exemple de milieu écologique caractéristique de ce territoire. En tant qu'entité liée à la montagne, l'étage subalpin est à la fois sensible et actif dans la surveillance des changements environnementaux. En raison de sa position en altitude (au-delà de 1500 m d'altitude) et de ses caractéristiques écologiques spécifiques, l'étage subalpin dans cette région joue un rôle dans la préservation d'écosystème de haute altitude étant le dernier rempart entre les remontées climatiques et l'extinction des espèces spécifiques de ce milieu qui y trouvent refuge. Il correspond donc à une sentinelle des évolutions climatiques et écologiques dans le Massif du Sancy (Figure 8).

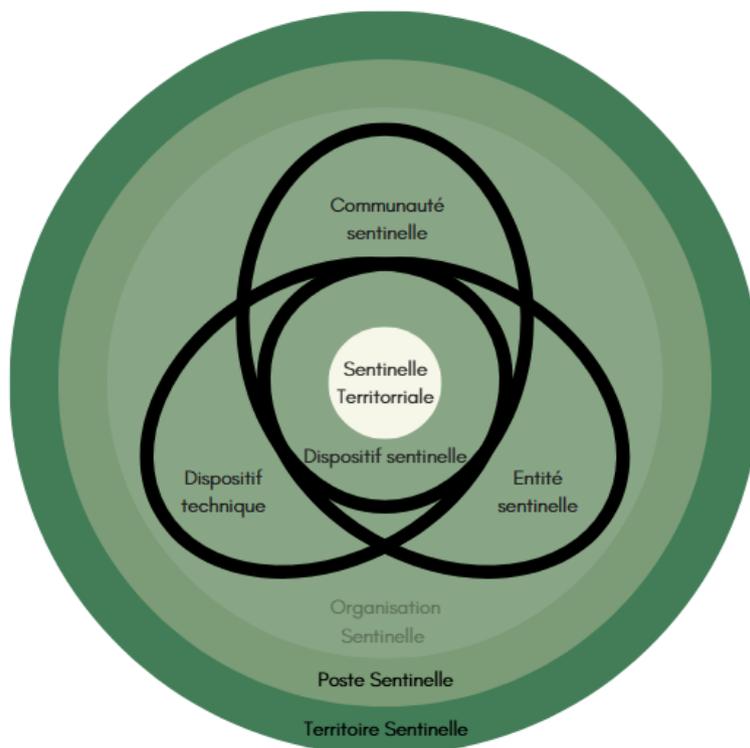


Figure 8: Représentation schématique de la sentinalité de l'étage subalpin dans le Massif du Sancy

L'étage subalpin du Massif du Sancy est équipé de divers dispositifs techniques qui facilitent la surveillance des changements de l'étage subalpin. Ces outils, comprenant des capteurs de température, des stations météorologiques, et des suivis de la biodiversité, permettent de collecter des données précieuses sur les conditions environnementales en constante évolution. Toutefois, malgré la présence de ces équipements et la prise en charge de la conservation de ce milieu par les RNN du Massif du Sancy, il ne possède pas d'organisation sentinelle dédiée à l'étage subalpin du Massif du Sancy.

Cependant, l'étage subalpin bénéficie d'un poste sentinelle actif sur les crêtes du Sancy, géré par la RNNCS ainsi que d'une communauté sentinelle composée des chercheurs, des techniciens et des gestionnaires de la conservation qui surveillent régulièrement les conditions écologiques. Ces

individus sont essentiels pour la collecte et l'analyse des données. Cette communauté sentinelle regroupe aussi des non professionnels comme des résidents et des passionnés de nature qui participent activement à la sensibilisation du public et à l'utilisation des informations scientifiques pour répondre aux changements observés.

L'étage subalpin du Massif du Sancy est également reconnu comme un territoire sentinelle en raison de ses caractéristiques géographiques uniques et de sa biodiversité riche. Cette reconnaissance en fait un observatoire important pour détecter et comprendre les impacts de changement climatique et écologique dans la région. En tant que sentinelle territoriale, l'étage subalpin du Massif du Sancy joue un rôle crucial dans la conservation d'espèces patrimoniales à l'échelle locale.

En résumé, l'étage subalpin du Massif du Sancy illustre comment un milieu peut être à la fois une sentinelle potentielle et effective, en utilisant des dispositifs techniques, en bénéficiant d'un soutien communautaire et en jouant un rôle significatif dans la conservation et la surveillance écologique dans un contexte territorial spécifique.

3.3.3 L'exemple du Campagnol terrestre

Le campagnol terrestre a été retenu comme entité sentinelle intéressante car il remplit toutes les propriétés de sentinalité attendues (Figure 9).

Tout d'abord, il s'agit d'une espèce prolifique et particulièrement ravageuse dans les prairies de pâturage et de fauche, où il exerce une pression notable sur l'écosystème. Ce comportement est d'autant plus important dans le contexte du réchauffement climatique, qui a un impact direct sur la période de reproduction des campagnols. En effet, le changement climatique peut prolonger ou modifier les cycles reproductifs du campagnol, ce qui peut accentuer leur présence et leur influence sur les prairies (Rochon, 2023).

De plus, les campagnols terrestres montrent une préférence marquée pour s'installer dans les prairies riches en pissenlit, une espèce dominante des prairies appauvries et fortement fertilisées. Cette particularité fait du campagnol une sentinelle de l'Anthropocène précieuse, en particulier celles liées à l'intensification agricole et aux changements dans la composition floristique des prairies (Streith, Nugier, 2019; Truchetet *et al.*, 2014). Ainsi, en tant qu'entité sentinelle, le campagnol terrestre offre des informations essentielles sur la santé des prairies et sur l'impact des changements climatiques.

De plus, le campagnol est intégré à un dispositif technique, puisque des suivis de pullulation sont réalisés pour mieux comprendre et anticiper ses effets sur l'écosystème. Cela permet de surveiller les variations de sa population en réponse aux conditions climatiques et agricoles. Ce dispositif technique est lui-même encadré par un dispositif sentinelle avec Arvicola Obs.

Cette approche collaborative permet d'élargir la portée du système de surveillance, en renforçant l'efficacité du suivi et en fournissant une vue d'ensemble plus complète des dynamiques écosystémiques (*Arvicola Obs*, 2024). Ce dispositif est couplé à des postes sentinelles divers, représentés par plusieurs zones de pullulation, ainsi qu'à une communauté sentinelle regroupant des chercheurs mais aussi des professionnels de l'agriculture au sein d'une organisation sentinelle la FREDON AuRa qui met en place le plan de surveillance du campagnol (FREDON Auvergne Rhône Alpes, 2024). En plus d'être une espèce connue du monde agricole dans le Massif Central, le campagnol terrestre se révèle être une sentinelle territoriale de l'Anthropocène dans le Massif du Sancy, en offrant une surveillance fine et pertinente des changements environnementaux.

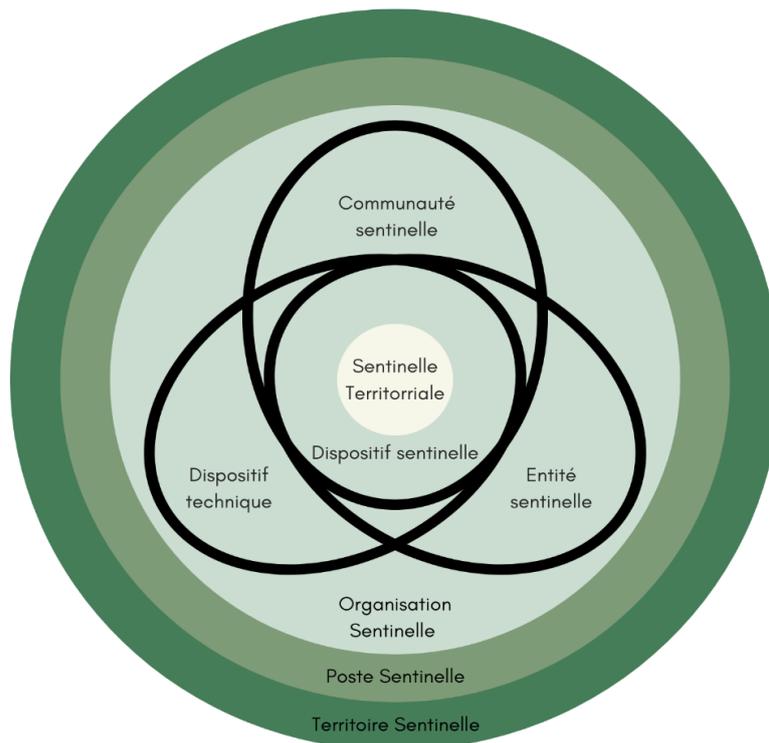


Figure 9: Représentation schématique de la sentinalité du campagnol, de la cyanobactérie et de l'eau

En résumé, le campagnol terrestre, en tant qu'espèce prolifique et ravageuse sensible aux changements climatiques et aux pratiques agricoles, joue un rôle crucial comme sentinelle écologique. C'est aussi une sentinelle territoriale dans le Massif du Sancy. Il est surveillé par un dispositif technique et collaboratif pour fournir des informations essentielles sur la santé des prairies et les dynamiques environnementales.

3.3.4 L'exemple des cyanobactéries

Les cyanobactéries, présentes dans les milieux aquatiques, ont également été identifiées comme des sentinelles de l'Anthropocène intéressantes. Leurs critères de sentinalité sont illustrés comme pour le campagnol terrestre dans la Figure 9. En effet, les cyanobactéries, présentes dans une grande variété d'environnements aquatiques et terrestres, jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes. Leur sensibilité aux variations environnementales, telles que les niveaux de nutriments, la température et la présence de polluants, les rend particulièrement fiables pour détecter les perturbations écologiques, voire même anthropiques ce qui en font des bonnes sentinelles. La pollution des milieux aquatiques, souvent causée par des activités humaines, comme les effluents d'élevage, les composts, les boues de stations de traitement des eaux usées, les engrais épandus sur les sols, ou encore le lessivage des terres lors d'épisodes pluvieux intenses, est un phénomène que les cyanobactéries peuvent aider à surveiller (ANSES, 2020).

Leur surveillance peut être assurée de manière continue grâce à des dispositifs techniques tels que la télédétection et les capteurs in situ, permettant ainsi un suivi régulier de la qualité de l'eau (Brient, 2022). Ces microorganismes peuvent être intégrés dans des systèmes de surveillance environnementale des dispositifs sentinelles, déclenchant des alertes précoces face aux changements écologiques. De plus, elles sont entourées par un réseau de postes sentinelles qui surveillent les zones à risque, comme les lacs et les étangs du Massif du Sancy, souvent utilisés pour la baignade (Speroni,

2023). En cas de prolifération importante, les cyanobactéries présentent un risque sanitaire pour les humains et les animaux, nécessitant ainsi une vigilance accrue.

Les données recueillies par ces dispositifs technique sont ensuite traitées par des organisations sentinelles spécialisées telles que l'ANSES et communiquées aux communautés locales, permettant ainsi une meilleure gestion environnementale. Leur prolifération de plus en plus marquée dans les lacs ou les zones humides, en particulier sur le territoire du Sancy ainsi que la prise en charge de cette alerte font des cyanobactéries des sentinelles territoriales du Massif du Sancy.

Ainsi, les cyanobactéries, sensibles aux variations environnementales et à la pollution, servent de sentinelles territoriale efficaces de l'Anthropocène, assurant une surveillance continue des écosystèmes aquatiques du Massif du Sancy.

3.3.5 L'exemple de l'eau

La ressource en eau douce, répond à tous les critères pour être considérée comme une sentinelle environnementale. En tant que potentielle sentinelle, la ressources en eau reflète de manière directe la santé des écosystèmes et les impacts des activités humaines. Les variations de qualité, telles que la présence de polluants, de nutriments ou de micro-organismes, sont des indicateurs précieux de perturbations écologiques. Cela en fait une entité sentinelle clé pour la détection rapide des changements environnementaux.

Sur le plan technique, la ressource en eau peut être surveillée à l'aide de nombreux dispositifs techniques, y compris des capteurs de qualité de l'eau, des analyses chimiques et biologiques, ainsi que la télédétection. Ces outils permettent un suivi continu et précis des paramètres critiques comme le pH, la concentration en nutriments, ou la présence de contaminants et facilitent la gestion de la ressource en eau grâce à des dispositif sentinelles.

La ressources en eau est surveillée dans plusieurs postes sentinelles, des endroits stratégiques tels que les lacs, les rivières et les zones humides, les nappes phréatiques qui sont des points clés pour évaluer l'état de l'eau à grande échelle. Ces données sont ensuite utilisées par des organisations sentinelles comme les Agences de l'eau ou les syndicats en charge de la gestion des bassin versant, pour mener des actions préventives ou correctives comme les schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) ou les schémas d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE), informant à la fois les autorités et les communautés locales.

De plus, des communautés sentinelles, agriculteurs, élus locaux, scientifiques, associations et autres, sont souvent dépendantes de l'eau pour des usages domestiques, agricoles ou récréatifs et sont directement impliquées dans la surveillance et la gestion des ressources en eau. À l'échelle du Sancy, la ressource en eau est une sentinelle territoriale, car elle traverse et relie différents territoires, jouant un rôle central dans la dynamique écologique, paysagère et agricole. Elle représente également un enjeu économique, une partie de cette eau étant commercialisée sous le nom de « Mont-Dore » (Sources Alma, 2024). De plus, cette ressource est essentielle à la prospérité des villes thermales de la zone d'étude, où l'eau joue un rôle central dans les activités de bien-être et de santé.

Finalement, la ressource en eau douce, répondant aux critères de sentinelle écologique, reflète directement la santé des écosystèmes et les impacts des activités humaines. Elle est surveillée grâce à des dispositifs techniques, tels que des capteurs et des analyses, dans des endroits stratégiques comme les lacs et rivières. Les données recueillies aident les communautés locales et les autorités à gérer les ressources en eau, faisant de l'eau une sentinelle territoriale essentielle dans le Massif du Sancy.

Ainsi, cette phase de recherche et de caractérisation des entités écologiques pour le projet STar a permis de dresser un tableau détaillé mais non exhaustif des sentinelles potentielles dans le Massif du Sancy. En intégrant des données bibliographiques, cartographiques, les retours d'experts et d'acteurs enquêtés, nous avons identifié des zones écologiques critiques, telles que les ZNIEFF, ZICO et les sites Natura 2000, qui jouent un rôle clé dans la conservation de la biodiversité régionale.

L'analyse des entités écologiques a révélé une grande diversité d'espèces et de milieux, chacun offrant des indices précieux sur les changements environnementaux. Les espèces comme le campagnol terrestre et les cyanobactéries, ainsi que des ressources telles que l'eau, se sont avérées particulièrement pertinentes en tant que sentinelles écologiques.

L'exemple de l'étage subalpin du Massif du Sancy, enfin, illustre comment des milieux spécifiques peuvent également agir comme sentinelles, reflétant les évolutions environnementales et contribuant à la gestion durable des ressources. Chacune de ces entités présente des critères de sentinalité forts, permettant de surveiller les impacts du changement climatique et des activités humaines.

L'évaluation des entités à l'aide de la grille de sentinalité a mis en lumière leur potentiel à détecter les perturbations écologiques et à servir de sentinelle territoriale. De plus, cette approche a permis d'affiner l'importance des propriétés sentinelle, assurant ainsi une continuité de recherche quant au degré de sentinalité.

Ainsi, la base de données élaborée constitue un outil pertinent pour le suivi des ruptures écologiques et l'évaluation des sentinelles les plus intéressantes. Elle facilite la mise en place d'une méthodologie de recherche robuste, alignée avec les objectifs du projet STar, visant à développer une « super sentinelle » capable d'anticiper et de réagir aux défis environnementaux actuels et futurs.

A la lumière de ces résultats et observation, il est important de discuter des implications de ces résultats pour l'identification des sentinelles territoriale et leur caractérisation. Cette discussion permettra de mieux comprendre comment les outils fournis pourront être améliorés et impliqués dans la suite du projet STar.

4 Discussion

Cette section aborde la discussion des résultats, en évaluant la pertinence de la base de données sentinelle et de la grille de sentinalité. Les limites de la base de données sont ensuite examinées, couvrant la sélection des espèces sentinelles, leur visibilité, la complexité d'utilisation, et le domaine de validité des résultats. Enfin, des perspectives et recommandations sont proposées, incluant l'enrichissement de la base de données, les perspectives pour la cartographie sensible des sentinelles territoriales, et une approche transdisciplinaire.

4.1 Pertinence de la base de données sentinelle et de la grille de sentinalité

La base de données sentinelle et les outils associés, tels que la grille de sentinalité et les cartes, sont des éléments essentiels pour comprendre et évaluer la biodiversité sur le territoire étudié. La base de données sentinelle offre des avantages significatifs en centralisant et en intégrant des données variées en un seul endroit. Elle permet d'avoir une vue d'ensemble cohérente et actuelle des aspects écologiques du territoire. En combinant des données théoriques et pratiques recueillies sur le terrain, cette base et la grille de sentinalité sont des outils qui permettent de mettre en place une méthodologie d'identification des sentinelles écologiques de l'Anthropocène dans le Massif du Sancy, en complément des sources bibliographiques.

De plus, la grille de sentinalité permet de caractériser une sentinelle territoriale de l'Anthropocène. Une sentinelle doit en effet regrouper l'ensemble des critères d'une propriété sentinelle pour la valider (Annexe 12).

De plus, après l'analyse approfondie des résultats obtenus, il apparaît intéressant de pousser la réflexion au-delà des degrés de sentinalité initialement énoncés. Nous avons constaté que certaines des propriétés identifiées jouent un rôle fondamental dans la définition et la caractérisation de ce que nous appelons la « sentinelle territoriale ».

La sentinelle est par exemple nécessairement reliée à un territoire pour être considérée comme sentinelle territoriale. En effet, au fil de l'étude, il est devenu clair que ces propriétés ne fonctionnent pas de manière isolée ; au contraire, elles sont interconnectées et interdépendantes. Certaines d'entre elles semblent constituer des conditions préalables pour d'autres, influençant ainsi leur manifestation et leur impact sur le degré de sentinalité d'une entité.

C'est dans ce contexte qu'il a été jugé pertinent de tenter une modélisation plus structurée de ces relations complexes. Afin de mieux comprendre comment ces propriétés s'articulent entre elles et de quelle manière elles contribuent à la sentinalité territoriale, plusieurs représentations sous forme d'arbre décisionnel ont été élaborées.

L'arbre de la Figure 10 vise à illustrer les différentes étapes et conditions nécessaires pour que la sentinelle atteigne un certain degré de sentinalité territoriale. Il permet également de visualiser les dynamiques et les interactions entre les différentes propriétés, en offrant un cadre analytique qui facilite l'interprétation des résultats et soutient la prise de décision notamment en orientant les priorités d'action et en identifiant les leviers d'amélioration pour un suivi territorial plus adapté et réactif face aux changements environnementaux.

Cet arbre allié à la base de données sentinelle ainsi que la grille de sentinalité pourrait permettre aux acteurs de terrain d’identifier les sentinelles dépourvues de communautés, de postes ou de dispositifs, révélant ainsi les lacunes à combler pour assurer un suivi efficace et adapter le territoire aux défis de l’Anthropocène.

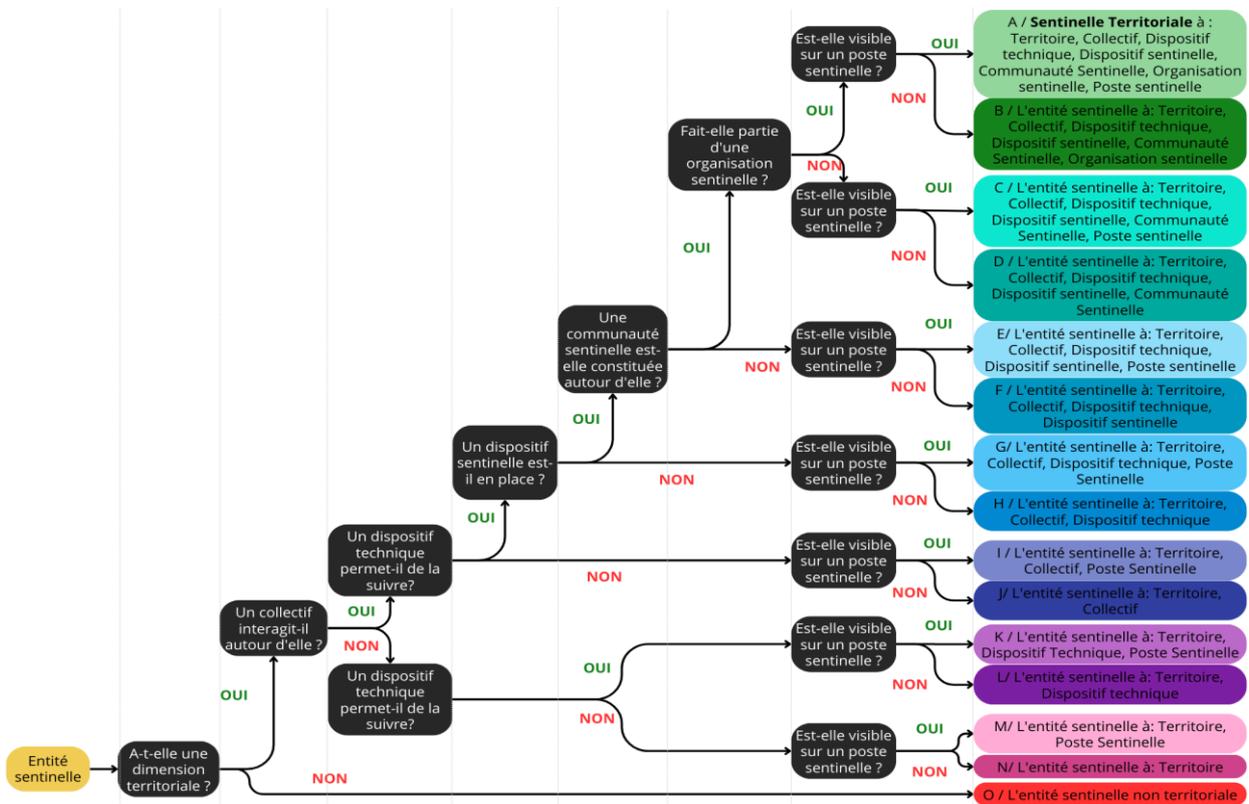


Figure 10: Arbre décisionnel de la typologie de la sentinelle territoriale

Cependant, certaines propriétés sentinelles doivent encore être éclaircies quant à leur caractère déterminant ou non de la sentinelle territoriale. Par exemple, la présence de postes sentinelles soulève des questions, positionner le poste sentinelle comme un caractère déterminant, comme illustré dans la Figure 11, conduit à un nombre plus restreint de degrés de sentinalité. Cela souligne l’importance de continuer à examiner et affiner notre compréhension de ces propriétés pour assurer une représentation la plus fidèle possible des dynamiques territoriales.

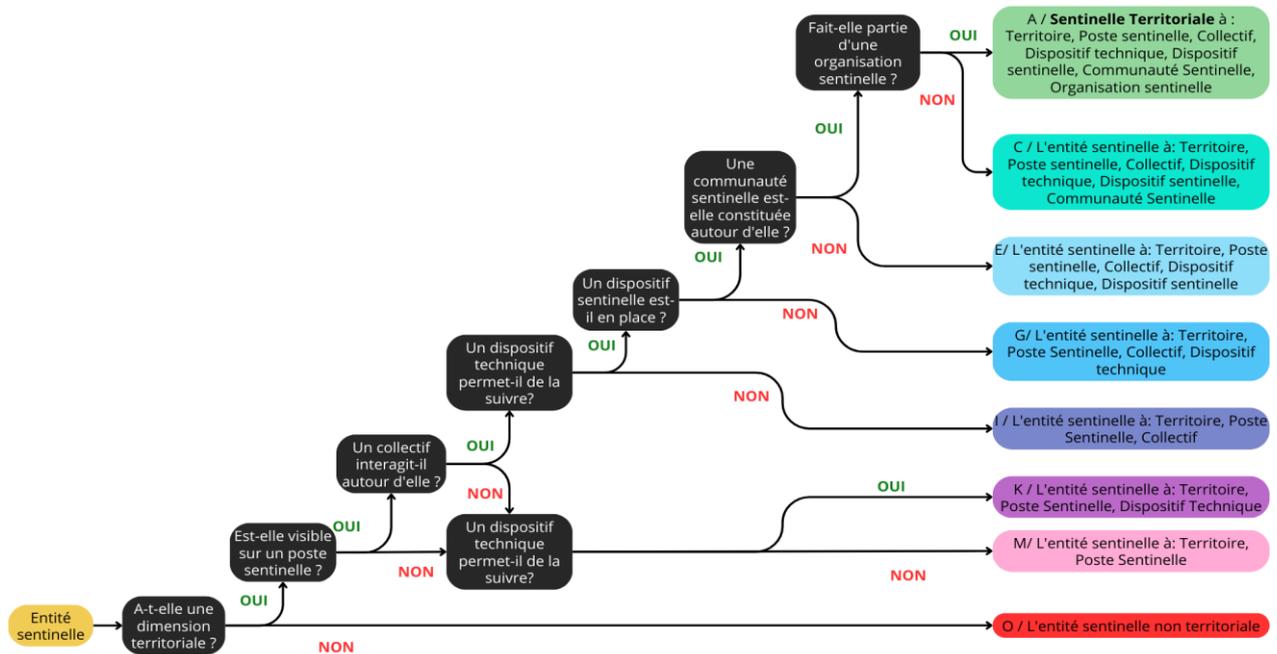


Figure 11: Arbre décisionnel de la typologie de la sentinelle territoriale avec le poste sentinelle en propriété discriminante

En somme, cette démarche vise à mieux comprendre la hiérarchie et l'importance relative des propriétés étudiées, pour essayer d'atteindre une typologie de la sentinelle territoriale tout en fournissant un outil visuel et méthodologique pour évaluer les sentinelles territoriale de manière plus précise et nuancée.

4.2 Limites de la base de données

4.2.1 Sélection des espèces sentinelles

Certaines limites ont été identifiées au cours du travail. Les entités dites « sentinelles potentielle » ont été sélectionnées en fonction des recherches disponibles et des préoccupations exprimées lors des entretiens, ce qui conduit à une vision nécessairement partielle et subjective du territoire. Ces sentinelles ne couvrent pas toutes les entités présentes, mais seulement celles jugées pertinentes par les chercheurs, les acteurs et usagers du territoire rencontrés dans l'étude. De plus, l'importance des sentinelles n'est pas pondérée en fonction d'un potentiel degré d'expertise de l'interlocuteur ou de la source des informations, ce qui peut introduire un biais dans l'interprétation des données, notamment dans un sens scientifique brut, mais qui apporterait un déséquilibre dans des disciplines du projet STar. En réalité, la partialité, la subjectivité et le degré d'expertise variable des enquêtés ne sont pas considérés comme des limites par le projet, mais sont au cœur de celui-ci et sont assumées comme telles.

4.2.2 Visibilité et intérêt des espèces

La visibilité et l'intérêt des recherches et du grand public envers certaines espèces varient considérablement. Les végétaux, mammifères, oiseaux et amphibiens sont plus visibles et perceptibles à l'œil humain, ce qui explique en partie leur importance dans les recherches et leur intérêt aux yeux du grand public. La base de données repose en grande partie sur la recherche bibliographique locale et les témoignages des acteurs enquêtés, qui tendent à se concentrer sur ces groupes plus visibles. En revanche, les insectes, papillons et odonates, bien que faisant l'objet de recherches plus récentes, restent encore relativement peu connus. Les poissons, crustacés, quant à

eux, vivent dans le réseau hydrologique, et les milieux humides, une partie moins évidente du territoire ou suscitant un intérêt moindre parmi les personnes interrogées. Contrairement à certaines exceptions comme les cyanobactéries qui sont particulièrement visibles pour les communes qui surveillent leur prolifération, car elles impactent directement la qualité des eaux de baignade, nécessitant des contrôles réguliers pour garantir la sécurité sanitaire des sites touristiques et récréatifs. Cette disparité dans la visibilité et l'intérêt des espèces peut influencer les données collectées et les priorités de recherche, soulignant ainsi l'importance de continuer à élargir l'inclusion de ces groupes moins apparents pour une évaluation plus complète et équilibrée de la biodiversité.

4.2.3 Complexité d'utilisation

Les journées de transect réalisées en été ont révélé que, bien que la base de données soit indispensable pour offrir une vision globale du potentiel écologique du territoire, elle présente des limites en termes d'observation pratique. Son utilisation sur le terrain est fortement dépendante des connaissances en écologie des personnes impliquées sur le terrain.

De plus, la complexité de sa construction et le fait qu'elle n'ait pas été prise en main par d'autres personnes peuvent limiter son utilisation. Cependant, sa fonctionnalité permettra aux utilisateurs de se familiariser avec la base et sa construction, de naviguer facilement entre les données, et de visualiser les informations à l'aide de cartes et de graphiques. Cela souligne la nécessité de former les futurs utilisateurs de la base de données. C'est pourquoi une fiche explicative a été ajoutée pour permettre une prise en main effective de l'outil.

4.2.4 Domaine de validité des résultats obtenus

Concernant le domaine de validité des résultats obtenus et leur applicabilité à d'autres territoires, la question se pose de savoir si les conclusions tirées pour le Massif du Sancy peuvent être extrapolées à d'autres régions, notamment aux massifs subalpins, dans des contextes géographiques et écologiques différents.

Les sentinelles écologiques identifiées dans cette étude sont spécifiquement adaptées au Massif du Sancy et au contexte particulier du projet STar. Cependant, la méthodologie développée et les outils associés, tels que la base de données et la grille de degré de sentinalité, seraient tout à fait transposables à d'autres territoires.

La clé de cette transposabilité réside dans la capacité de chaque territoire à identifier ses propres ruptures écologiques et ses propres sentinelles potentielles en fonction des connaissances disponibles localement. En adaptant ces potentielles sentinelles dans la base de données, il est tout à fait possible d'utiliser la grille de sentinalité fournis pour identifier les sentinelles territoriale répondant aux spécificités locales. De plus, cette base de données pourrait également devenir un outil d'animation pour une communauté des sentinelles territoriales, en favorisant le partage d'expériences et de bonnes pratiques, et en créant un réseau d'acteurs engagés dans la surveillance écologique et la gestion durable des territoires.

Ainsi, bien que les sentinelles identifiées ici soient spécifiques au Sancy, la démarche méthodologique peut être appliquée pour évaluer et des sentinelles territoriales dans d'autres contextes territoriaux.

4.3 Perspectives et recommandations

4.3.1 Enrichissement de la base de données

Pour la suite du projet, il serait pertinent d'envisager l'enrichissement progressif de la base de données au fur et à mesure des entretiens et rencontres, afin d'inclure une plus grande diversité d'espèces et de pondérer les informations en fonction des sources. Chaque entretien, mais aussi chaque membre du projet avec ses connaissances du territoire, permettent d'affiner les connaissances sur la sentinalité des espèces présentes et d'améliorer la grille de critères de sentinalité. Cela la rendra à la fois plus compréhensible et pertinente pour tous les acteurs impliqués dans le projet, tant sur le plan théorique que pratique. De plus, rendre la base de données accessible à l'ensemble des membres du projet, ou au moins aux représentants des disciplines du vivant, et fournir des explications sur son utilisation, contribuera à une meilleure appropriation de cet outil. Ces ajustements permettront de maximiser l'utilité de la base de données sentinelle, garantissant ainsi une évaluation plus précise et représentative des sentinelles du territoire.

4.3.2 Perspectives de cartographie sensible des sentinelles territoriales

Une cartographie des sentinelles pourrait s'avérer très utile pour visualiser les entités écologiques les plus significatives dans le cadre du projet. En créant une carte du territoire, il serait possible de mettre en évidence les sentinelles territoriales qui jouent un rôle plus important pour des communautés au sein du territoire et d'illustrer leur importance relative.

Cette approche pourrait se décliner en plusieurs types de cartes. Par exemple, il serait possible d'élaborer une carte représentant les sentinelles en fonction de leur impact écologique et de leur pertinence pour le territoire. Une autre possibilité serait de représenter des zones du territoire proportionnellement à l'importance écologique, sociale et économique qu'elle possède selon des acteurs territoriaux. Cela permettrait de visualiser comment chaque sentinelle contribue à la gestion et à la compréhension du territoire, en mettant en avant les zones d'intérêt et les enjeux particuliers.

En outre, une possibilité serait de créer des cartes de représentation sensible, incluant des verbatims et des illustrations capturant les perceptions et les expériences des acteurs locaux. Ces cartes pourraient refléter non seulement les aspects écologiques, mais aussi les dimensions culturelles et sociales des sentinelles territoriale, enrichissant ainsi la compréhension globale du territoire.

Cette approche représente une perspective d'étude et de réalisation prometteuse pour l'avenir. Elle offrirait des opportunités intéressantes pour explorer les méthodes de cartographie participative, intégrer des données qualitatives et quantitatives, et développer des outils visuels facilitant la communication des résultats et la prise de décision.

4.3.3 Approche transdisciplinaire et flexible du sujet

Ce projet se distingue par son approche transdisciplinaire et la création progressive d'une méthodologie adaptée aux spécificités du terrain et des enjeux identifiés. Contrairement aux études approches de recherche classique qui suivent des protocoles scientifiques préétablis, ce projet évolue au fil de son avancement et des interactions avec divers interlocuteurs. Cette flexibilité permet d'ajuster les méthodes en fonction des retours et des découvertes, favorisant ainsi l'émergence de solutions pertinentes et innovantes. En sortant des cadres scientifiques traditionnels, ce projet explore de nouvelles voies, tant sur le plan conceptuel que pratique, pour répondre de manière plus complète aux défis posés. Bien que les résultats de cette étude puissent sembler encore incomplets ou en développement, cette approche adaptative et évolutive enrichit notre compréhension globale du territoire étudié et facilite la création de stratégies plus précisément adaptées aux réalités locales.

Conclusion

Cette étude s'est intéressée à la capacité des entités écologiques à devenir des outils de détection et d'alerte face aux perturbations environnementales dans le contexte de l'**Anthropocène**. Le problème central auquel cette recherche répond est : **quelles sentinelles écologiques de l'Anthropocène peuvent être identifiées dans le Massif du Sancy en croisant littérature scientifique, données publiques, enquêtes de terrain et analyse cartographique ?**

En développant le concept de « **sentinelle territoriale** », basé sur des concepts issus de la littérature scientifique tels que les **limites planétaires**, les **signaux d'alerte précoce** (*early warning signals*) et la **résilience** des écosystèmes, nous avons cherché à identifier des espèces et phénomènes écologiques capables de signaler les ruptures locales causées par les pressions anthropiques croissantes. Ce concept est testé dans un territoire de moyenne montagne du Massif Central, le Massif du Sancy, soumis à des enjeux écologiques et climatiques importants.

Les pressions exercées sur cette région, telles que le changement climatique, la pollution et la fragmentation des habitats, ont généré des ruptures écologiques majeures, menaçant la biodiversité et la résilience des écosystèmes. À travers une **méthodologie interdisciplinaire**, combinant **recherche bibliographique, entretiens** avec des experts locaux et construction d'une **base de données** spécifique, cette étude a identifié des sentinelles écologiques, 94 espèces, 11 milieux 3 ressources et 1 infrastructure, susceptibles de détecter précocement ces déséquilibres. Des espèces comme le campagnol terrestre et les cyanobactéries se sont révélées être des sentinelles territoriales pertinentes, de par leur sensibilité aux variations climatiques et environnementales propres à ce territoire.

L'un des apports méthodologiques majeurs de ce travail a été l'élaboration d'une **grille de critères de « sentinalité »**, permettant de qualifier et d'évaluer des entités. Cette grille qui s'appuie sur 7 propriétés sentinelles, permet de qualifier les différentes sentinelles en fonction de leur capacité à signaler des changements écologiques pertinents. Ce cadre analytique pourrait être utilisé pour guider la sélection d'autres sentinelles dans le projet STar, mais aussi dans un cadre plus large appliqué à d'autres territoire, dans des contextes similaires.

Par ailleurs, l'approche transdisciplinaire du projet STar, dans lequel s'inscrit cette étude, a été essentielle pour explorer et comprendre les transformations écologiques actuelles dans le Massif du Sancy. Le mémoire insiste sur l'importance de combiner les **connaissances scientifiques et savoirs locaux**, deux sources souvent perçues comme dissociées, pour développer des outils de gestion environnementale qui soient réellement adaptés aux spécificités territoriales. Les connaissances des acteurs territoriaux, souvent sous-estimées, apportent des perspectives différentes pour interpréter les données scientifiques et proposer des outils de gestion plus adaptées au territoire.

Enfin, le mémoire ouvre des perspectives pour l'intégration des sentinelles écologiques dans l'étude des **ruptures de l'Anthropocène** sur les territoires. Ces sentinelles pourraient devenir des éléments-clés pour orienter les stratégies de gestion des territoires particulièrement touché par les ruptures comme le Massif du Sancy. La sensibilisation des communautés locales et des gestionnaires de ces territoires est également indispensable pour assurer la durabilité des écosystèmes face aux défis de l'Anthropocène.

Bibliographie

AGROPARISTECH, 2021. AgroParisTech. *AgroParisTech* [en ligne]. 7 octobre 2021. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.agroparistech.fr/node>

ALBERT, Aurélie et MAKHCHOUN, Manale, 2023. Massif du Sancy (Puy-de-Dôme) : un bilan touristique au sommet cet été. *France 3 Auvergne-Rhône-Alpes* [en ligne]. 7 septembre 2023. [Consulté le 1 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/puy-de-dome/clermont-ferrand/massif-du-sancy-puy-de-dome-un-bilan-touristique-au-sommet-cet-ete-2835410.html>

AMIARD, Jean-Claude et AMIARD-TRIQUET, Claude, 2008. *Les biomarqueurs dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques*. Lavoisier. ISBN 978-2-7430-1960-0.

ANSES, 2020. Les cyanobactéries en questions. *Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail* [en ligne]. 23 septembre 2020. [Consulté le 26 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/content/les-cyanobacteries-en-questions>

ANTONELLI, Alexandre, KISSLING, W. Daniel, FLANTUA, Suzette G. A., BERMÚDEZ, Mauricio A., MULCH, Andreas, MUELLNER-RIEHL, Alexandra N., KREFT, Holger, LINDER, H. Peter, BADGLEY, Catherine, FJELDSÅ, Jon, FRITZ, Susanne A., RAHBK, Carsten, HERMAN, Frédéric, HOOGHMSTRA, Henry et HOORN, Carina, 2018. Geological and climatic influences on mountain biodiversity. *Nature Geoscience*. octobre 2018. Vol. 11, n° 10, pp. 718-725. DOI 10.1038/s41561-018-0236-z.

AUBERT, Mael, 2023. Le massif du Sancy doit se réinventer pour survivre. *Le Connecteur* [en ligne]. 13 mars 2023. [Consulté le 1 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://leconnecteur.org/le-massif-du-sancy-doit-se-reinventer-pour-survivre/>

[Auteur ?], 2024. Arvicola Obs. *Arvicola Obs* [en ligne]. [Consulté le 26 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvicola-obs.fr/>

AZOTE FOR STOCKHOLM RESILIENCE CENTRE, 2012. Planetary boundaries. [en ligne]. 19 septembre 2012. [Consulté le 24 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

BERGENGREN, Jon C., WALISER, Duane E. et YUNG, Yuk L., 2011. Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change. *Climatic Change*. 1 août 2011. Vol. 107, n° 3, pp. 433-457. DOI 10.1007/s10584-011-0065-1.

BLANCHON, David, KECK, Frédéric, TOURNEAU, François-Michel Le, TONNELAT, Stéphane et ZUNIGA-TERAN, Adriana, 2020. Sentinel Territories: A New Concept for Looking at Environmental Change. . 2020.

BONNET, Emmanuel et LANDIVAR, Diego, 2024. Bonnet et Landivar 2024 RFG.pdf - Seafire AgroParisTech. [en ligne]. 2024. [Consulté le 9 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://seafire.agroparistech.fr/lib/f12be8cf-3ea8-4986-a274-2a9a0c1c2dfb/file/RESSOURCES-DOCUMENTATION/Ressources%20litt%C3%A9rature%20scientifique/Bonnet%20et%20Landivar%202024%20RFG.pdf>

BONNEUIL, Christophe et FRESSOZ, Jean-Baptiste, 2013. *L'Èvènement Anthropocène, la Terre, l'histoire et nous*, Paris, Le Seuil. 2013.

BORENSTEIN, Seth, 2024. Le juin le plus chaud suit les 12 mois de records de température. *euronews* [en ligne]. 9 juillet 2024. [Consulté le 16 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://fr.euronews.com/green/2024/07/08/13-mois-consecutif-des-records-de-temperature-mondiale-en-juin-la-terre-depassant-la-limit>

BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ NATURE, 2024. L'ennemi présumé des prairies jurassiennes en partie disculpé. *Bourgogne-Franche-Comté Nature* [en ligne]. 27 mars 2024. [Consulté le 26 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://bfcnature.fr/lennemi-presume-des-prairies-jurassiennes-en-partie-disculpe/>

BRIENT, Luc, 2022. Les outils de détection. *Les cyanobactéries d'eaux douces* [en ligne]. 2022. [Consulté le 26 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cyanobacteries.fr/les-outils-de-detection/>

CARIGNAN, Vincent et VILLARD, Marc-André, 2001. Selecting Indicator Species to Monitor Ecological Integrity. . 2001.

CARPENTER, S. R. et BROCK, W. A., 2006. Rising variance: a leading indicator of ecological transition. *Ecology Letters*. 2006. Vol. 9, n° 3, pp. 311-318. DOI 10.1111/j.1461-0248.2005.00877.x.

CRUTZEN, Paul J., 2002. Geology of mankind. *Nature*. janvier 2002. Vol. 415, n° 6867, pp. 23-23. DOI 10.1038/415023a.

CUCHEROUSSET, Julien, FRIED, Guillaume, COTE, Julien et RENAULT, David, 2015. Invasions biologiques et fonctionnement des écosystèmes ; caractérisation des impacts écologiques liés aux espèces invasives. *Revue d'Écologie*. 2015. Vol. 70, n° Supplement 12, pp. 49-52.

DAKOS, Vasilis, MATTHEWS, Blake, HENDRY, Andrew P., LEVINE, Jonathan, LOEUILLE, Nicolas, NORBERG, Jon, NOSIL, Patrik, SCHEFFER, Marten et DE MEESTER, Luc, 2019. Ecosystem tipping points in an evolving world. *Nature Ecology & Evolution*. 18 février 2019. Vol. 3, n° 3, pp. 355-362. DOI 10.1038/s41559-019-0797-2.

DALE, Virginia H. et BEYELER, Suzanne C., 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators*. 1 août 2001. Vol. 1, n° 1, pp. 3-10. DOI 10.1016/S1470-160X(01)00003-6.

DREAL AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2021. L'inventaire des ZNIEFF : présentation. *DREAL Auvergne-Rhône-Alpes* [en ligne]. 31 mai 2021. [Consulté le 22 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/l-inventaire-des-znieff-presentation-a19734.html>

FREDON AUVERGNE RHÔNE ALPES, 2024. Plan de surveillance Campagnols 2024 | FREDON Auvergne Rhône Alpes. [en ligne]. 2024. [Consulté le 10 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://fredon.fr/aura/plan-de-surveillance-campagnols-2024>

GENET, Cyrille et FRANCO, Pascal, 2023. VIDEO. Dans le Puy-de-Dôme, la réserve naturelle de Chastreix-Sancy traque le chat forestier. *France 3 Auvergne-Rhône-Alpes* [en ligne]. 17 août 2023. [Consulté le 22 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/puy-de->

dome/video-dans-le-puy-de-dome-la-reserve-naturelle-de-chastreix-sancy-traque-le-chat-forestier-2826425.html-2826425.html

GILLARD, Morgane, 2024. Pourquoi l'Anthropocène n'existe pas ? [en ligne]. 11 mai 2024. [Consulté le 20 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/terre-anthropocene-nexiste-pas-113334/>

GODET, Laurent, 2017. Les oiseaux anthropophiles : définition, typologie et conservation. *Annales de géographie*. 2017. Vol. 716, n° 4, pp. 492-517. DOI 10.3917/ag.716.0492.

GUNDERSON, Lance H., 2000. Ecological Resilience—In Theory and Application. *Annual Review of Ecology and Systematics*. novembre 2000. Vol. 31, n° 1, pp. 425-439. DOI 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425.

HASNAOUI AMRI, Nabil, 2018. Entre utopie, transition et rupture, quelle politique pour accompagner le développement d'une agriculture écologique et nourricière ? Illustration à partir du cas de Montpellier Métropole. *Pour*. 2018. Vol. 234-235, n° 2-3, pp. 271-278. DOI 10.3917/pour.234.0271.

HAZEN, Elliott L., SAVOCA, Matthew S., CLARK-WOLF, T.J., CZAPANSKIY, Max, RABINOWITZ, Peter M. et ABRAHMS, Briana, 2024. Ecosystem Sentinels as Early-Warning Indicators in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources* [en ligne]. 7 juin 2024. [Consulté le 18 juillet 2024]. DOI 10.1146/annurev-environ-111522-102317. Disponible à l'adresse : <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-environ-111522-102317>

JOUVANCOURT, Pierre de, 2024. Qui a tué l'Anthropocène ? *Terrestres* [en ligne]. 8 avril 2024. [Consulté le 16 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.terrestres.org/2024/04/08/qui-a-tue-lanthropocene/>

KECK, Frédéric, 2020. *Les sentinelles des pandémies. Chasseurs de virus et observateurs d'oiseaux aux frontières de la Chine* [en ligne]. Zones sensibles. [Consulté le 27 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.zones-sensibles.org/frederic-keck-les-sentinelles-des-pandemies/>

KECK, Frédéric et LAKOFF, Andrew, 2013. Preface: Sentinel Devices. *Limn* [en ligne]. 2013. Vol. 1, n° 3. [Consulté le 7 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://escholarship.org/uc/item/0xq1t67m>

KÉFI, Sonia, DAKOS, Vasilis, SCHEFFER, Marten, VAN NES, Egbert H. et RIETKERK, Max, 2013. Early warning signals also precede non-catastrophic transitions. *Oikos*. mai 2013. Vol. 122, n° 5, pp. 641-648. DOI 10.1111/j.1600-0706.2012.20838.x.

LEROY, Thierry, THOMAS, C, PRIME, A et LOCHON, Iris, 2023. *Plan_de_gestion_RNNCS-ENS_2022-2031_Tome1_etatdeslieux_RNNCS_light.pdf*. 2023.

LOCHON, Iris et LEROY, Thierry, 2021. *Diagnostic de vulnerabilite_Chastreix Sancy* [en ligne]. mars 2021. Disponible à l'adresse : <https://naturadapt.com/groups/communaute/documents/226/get>

MASSIF DU SANCY, 2024a. Massif du Sancy, Volcan du Puy de Sancy en Auvergne. *Massif du Sancy* [en ligne]. 2024. [Consulté le 4 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.sancy.com/decouvrir/le-massif-du-sancy/>

MASSIF DU SANCY, 2024b. Marquage des produits avec le logo « Origine Sancy ». *Espace pro du Massif du Sancy* [en ligne]. 2024. [Consulté le 19 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://pro.sancy.com/communication-boite-outils/marquage-origine-sancy/>

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES, 2023. Publication du 6e rapport de synthèse du GIEC. *Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires* [en ligne]. 22 mars 2023. [Consulté le 23 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>

OMM, 2024. La température mondiale devrait temporairement dépasser les valeurs préindustrielles de plus de 1,5 °C ces cinq prochaines années. *Organisation Météorologique Mondiale* [en ligne]. 4 juin 2024. [Consulté le 16 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://wmo.int/fr/media/news/la-temperature-mondiale-devrait-temporairement-depasser-les-valeurs-preindustrielles-de-plus-de-15>

PNRVA, 2024. Biodiversité remarquable | Parc des Volcans d'Auvergne. *Découvrir* [en ligne]. 2024. [Consulté le 27 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.decouvrir.parcdesvolcans.fr/biodiversite-remarquable>

RICHARDSON, Katherine, STEFFEN, Will, LUCHT, Wolfgang, BENDTSEN, Jørgen, CORNELL, Sarah E., DONGES, Jonathan F., DRÜKE, Markus, FETZER, Ingo, BALA, Govindasamy, VON BLOH, Werner, FEULNER, Georg, FIEDLER, Stephanie, GERTEN, Dieter, GLEESON, Tom, HOFMANN, Matthias, HUISKAMP, Willem, KUMMU, Matti, MOHAN, Chinchu, NOGUÉS-BRAVO, David, PETRI, Stefan, PORKKA, Miina, RAHMSTORF, Stefan, SCHAPHOFF, Sibyll, THONICKE, Kirsten, TOBIAN, Arne, VIRKKI, Vili, WANG-ERLANDSSON, Lan, WEBER, Lisa et ROCKSTRÖM, Johan, 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*. 13 septembre 2023. Vol. 9, n° 37, pp. eadh2458. DOI 10.1126/sciadv.adh2458.

ROCHON, Léa, 2023. Le campagnol terrestre, ce fléau des prairies. *L'Avenir Agricole de l'Ardèche* [en ligne]. 12 septembre 2023. [Consulté le 26 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.avenir-agricole-ardeche.fr/articles/12/09/2023/Le-campagnol-terrestre-ce-fleau-des-prairies-91619/>

ROCKSTRÖM, Johan, STEFFEN, Will, NOONE, Kevin, PERSSON, Åsa, CHAPIN, F. Stuart III, LAMBIN, Eric, LENTON, Timothy, SCHEFFER, Marten, FOLKE, Carl, SCHELLNHUBER, Hans Joachim, NYKVIST, Björn, DE WIT, Cynthia, HUGHES, Terry, VAN DER LEEUW, Sander, RODHE, Henning, SÖRLIN, Sverker, SNYDER, Peter, COSTANZA, Robert, SVEDIN, Uno, FALKENMARK, Malin, KARLBERG, Louise, CORELL, Robert, FABRY, Victoria, HANSEN, James, WALKER, Brian, LIVERMAN, Diana, RICHARDSON, Katherine, CRUTZEN, Paul et FOLEY, Jonathan, 2009. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* [en ligne]. 18 novembre 2009. Vol. 14, n° 2. [Consulté le 24 juillet 2024]. DOI 10.5751/ES-03180-140232. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>

RYKIEL, Edward J., 1985. Towards a definition of ecological disturbance. *Australian Journal of Ecology*. septembre 1985. Vol. 10, n° 3, pp. 361-365. DOI 10.1111/j.1442-9993.1985.tb00897.x.

RYKIEL JR, Edward J., 1985. Towards a definition of ecological disturbance. *Australian Journal of Ecology*. 1985. Vol. 10, n° 3, pp. 361-365. DOI 10.1111/j.1442-9993.1985.tb00897.x.

SCHEFFER, Marten, CARPENTER, Steve, FOLEY, Jonathan A., FOLKE, Carl et WALKER, Brian, 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*. octobre 2001. Vol. 413, n° 6856, pp. 591-596. DOI 10.1038/35098000.

SCHWEIBOLD, Laura, 2022. Le phytoplancton, une sentinelle du changement climatique. *The Conversation* [en ligne]. 10 octobre 2022. [Consulté le 20 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <http://theconversation.com/le-phytoplancton-une-sentinelle-du-changement-climatique-187545>

SOURCES ALMA, 2024. Mont Dore. *Sources Alma* [en ligne]. 2024. [Consulté le 10 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.sources-alma.com/marques/mont-dore/>

SPERONI, Maurane, 2023. Cyanobactéries : un nouveau dispositif pour surveiller leur prolifération dans la rivière la Mayenne. *Ouest-France.fr* [en ligne]. 6 août 2023. [Consulté le 26 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/mayenne/cyanobacteries-un-nouveau-dispositif-pour-surveiller-leur-proliferation-dans-la-riviere-la-mayenne-ff6c0544-3142-11ee-9d4f-b0de70efee29>

STREITH, Michel et NUGIER, Armelle, 2019. Les relations inter-groupes à l'épreuve du campagnol terrestre. In : *Humains et animaux dans les agricultures alternatives* [en ligne]. Éducagri éditions. pp. 223-237. [Consulté le 30 août 2024]. ISBN 979-10-275-0355-1. Disponible à l'adresse : https://shs-cairn-info.ezproxy.universite-paris-saclay.fr/article/EDAGRI_VANDA_2019_01_0223?lang=fr&tab=texte-integral

TOMA, Bernard, 2009. La fonction sentinelle en épidémiologie. . 2009.

TRUCHETET, Denis, COUVAL, Geoffroy, MICHELIN, Yves et GIRAUDOUX, Patrick, 2014. Exploring the factors that affect water vole (*Arvicola terrestris*) outbreaks in grasslands. *Fourrages*. 1 décembre 2014. Vol. 2014, pp. 279-284.

UMR TERRITOIRE, [sans date]. UMR Territoires. [en ligne]. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://umr-territoires.fr/>

YOUSSEF, Sami, BAUMEL, Alex et MEDAIL, Frédéric, 2009. Analyse écologique des populations d'*Armeria arenaria*, espèce végétale bio-indicatrice du piétinement de la flore littorale des Maures (Var, France). . 2009.

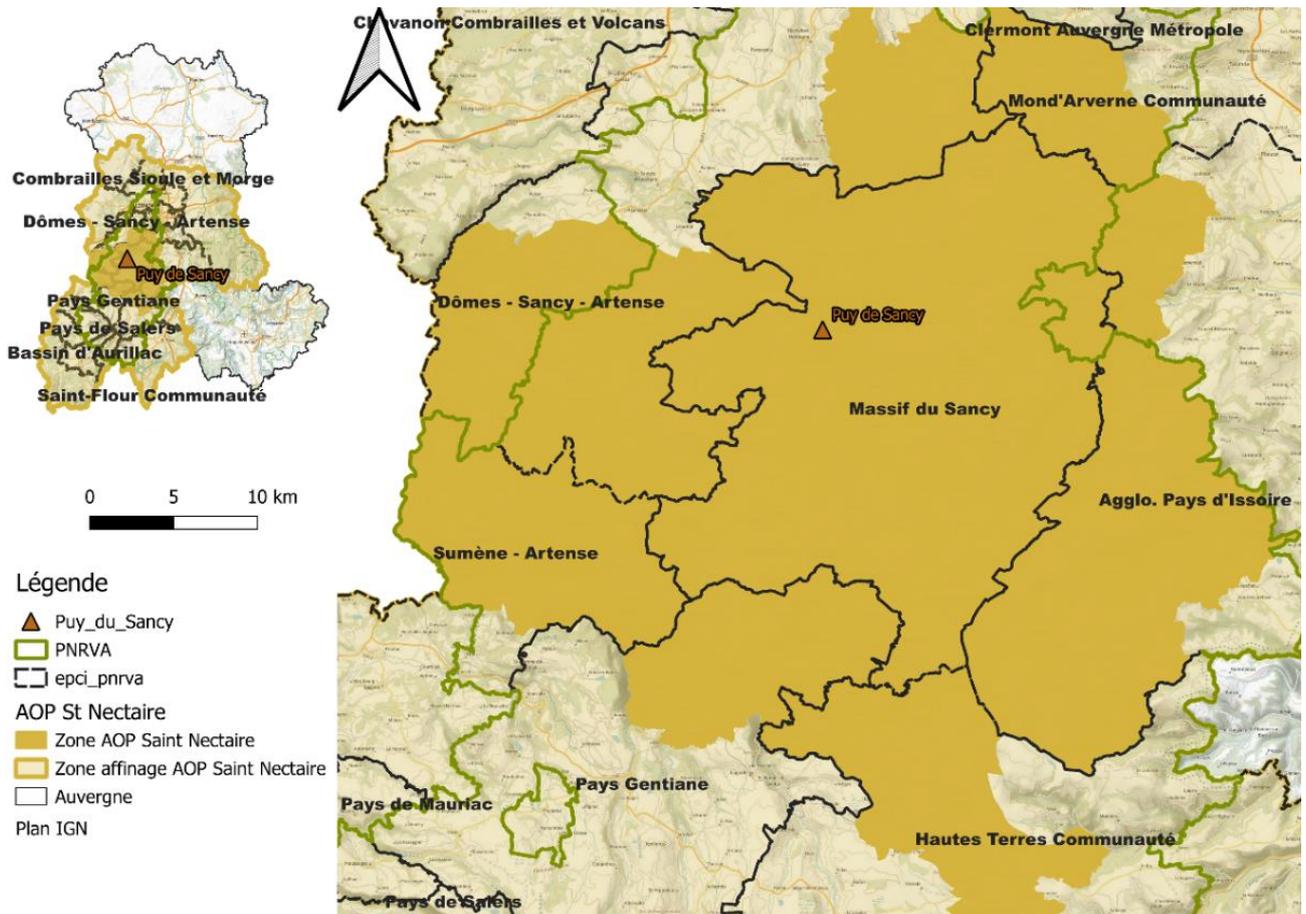
ZEKRI, Marie, 2023. La sixième limite planétaire a été franchie. Et maintenant? *National Geographic* [en ligne]. 2 octobre 2023. [Consulté le 17 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/eau-douce-danger-ressource-naturelle-la-sixieme-limite-planetaire-a-ete-franchie-et-maintenant>

ZHANG, Zhiwei, CHI, Yuan, LIU, Dahai, QU, Yubing, MA, Xuejian, XING, Wenxiu et LIU, Zhenhang, 2022. Spatiotemporal pattern of landscape ecological sensitivity in coastal zone in the last 30 years: an empirical study of Shandong Peninsula, China. *Journal of Coastal Conservation*. 4 novembre 2022. Vol. 26, n° 6, pp. 55. DOI 10.1007/s11852-022-00903-1.

ZHONG, Raymond, 2024. Are We in the 'Anthropocene,' the Human Age? Nope, Scientists Say. *The New York Times* [en ligne]. 5 mars 2024. [Consulté le 15 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.nytimes.com/2024/03/05/climate/anthropocene-epoch-vote-rejected.html>

Annexes

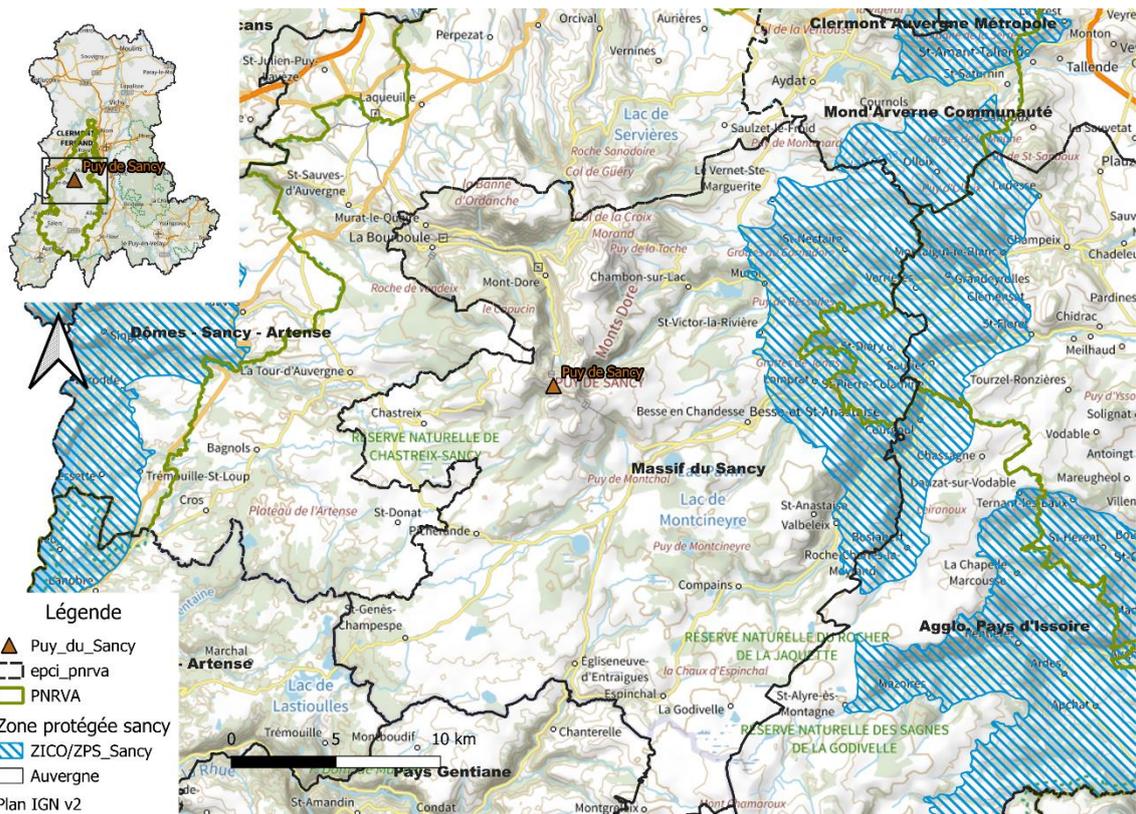
Annexe 1 : Représentation cartographique de la zone AOP Saint Nectaire sur le Massif du Sancy



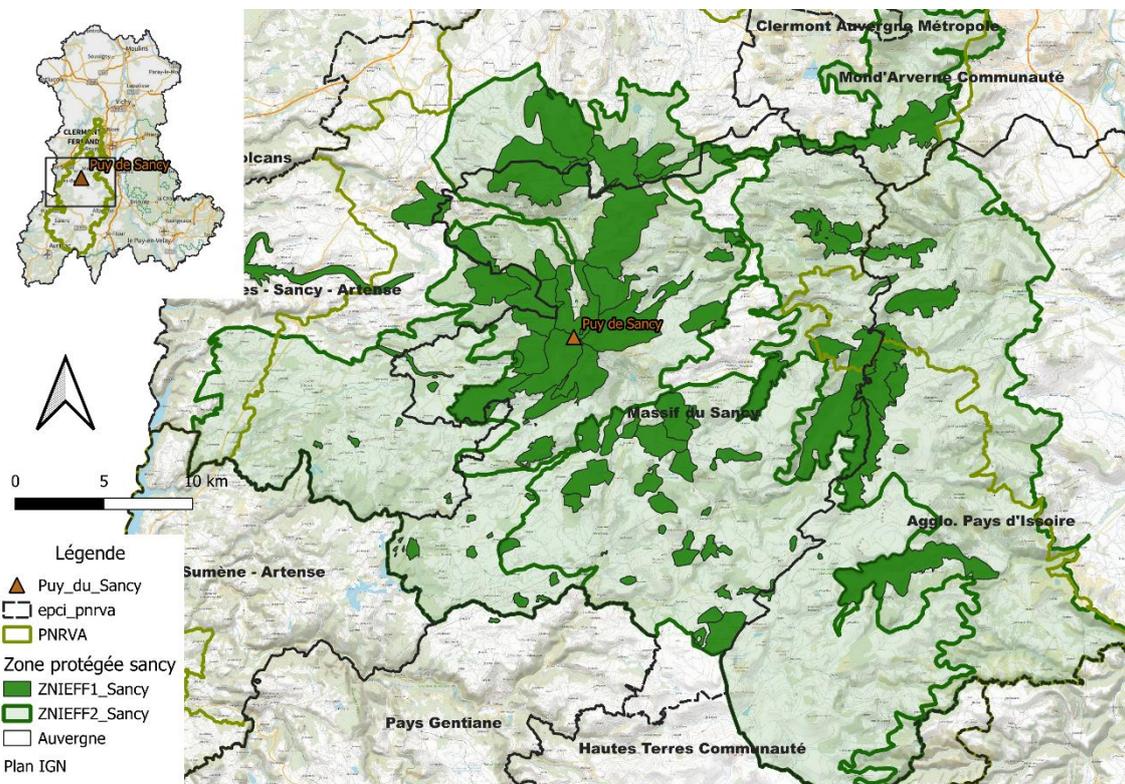
Annexe 2 : Tableau récapitulatif des entretiens exploratoire réalisé dans le cadre de cette étude pour le projet STar

Date	Personne ou structure entretenue	Secteur géographique	Nombre d'enquêteurs	Thème de l'entretien
22/04/2024	CPIE Clermont-Dômes	Theix	2	Ecologie dans le Massif du Sancy
23/04/2024	RNN Chastreix-Sancy	Chastreix	2	Ecologie dans le Massif du Sancy Visite terrain sur la RNN
24/04/2024	PRNVA		2	Activité sur le massif du Sancy (tourisme, agriculture)
143/05/2024	Conseiller municipal Acteur du tourisme	Chastreix	7	Evolution du territoire Gestion administrative
21/06/2024	Membre du projet	Clermont-Ferrand	2	Ecologie dans le Massif du Sancy
21/06/2024	Fédération de Pêche 63	Puy de Dôme	3	Ecologie dans le Massif du Sancy
26/06/2024	Expert	Clermont-Ferrand	4	Historique, agriculture, écologie sur le Massif du Sancy
22/08/2021	Cap Guery	Lac du Guéry	3	Ecologie sur le Massif du Sancy Gestion Administrative Rôle du Cap Guéry
29/08/2024	Agriculteur, représentant associatif	Mont-Dore	3	Agriculture dans le Sancy
29/08/2024	ONF responsable d'unité territoriale	Mont-Dore	3	Forêt dans le Sancy

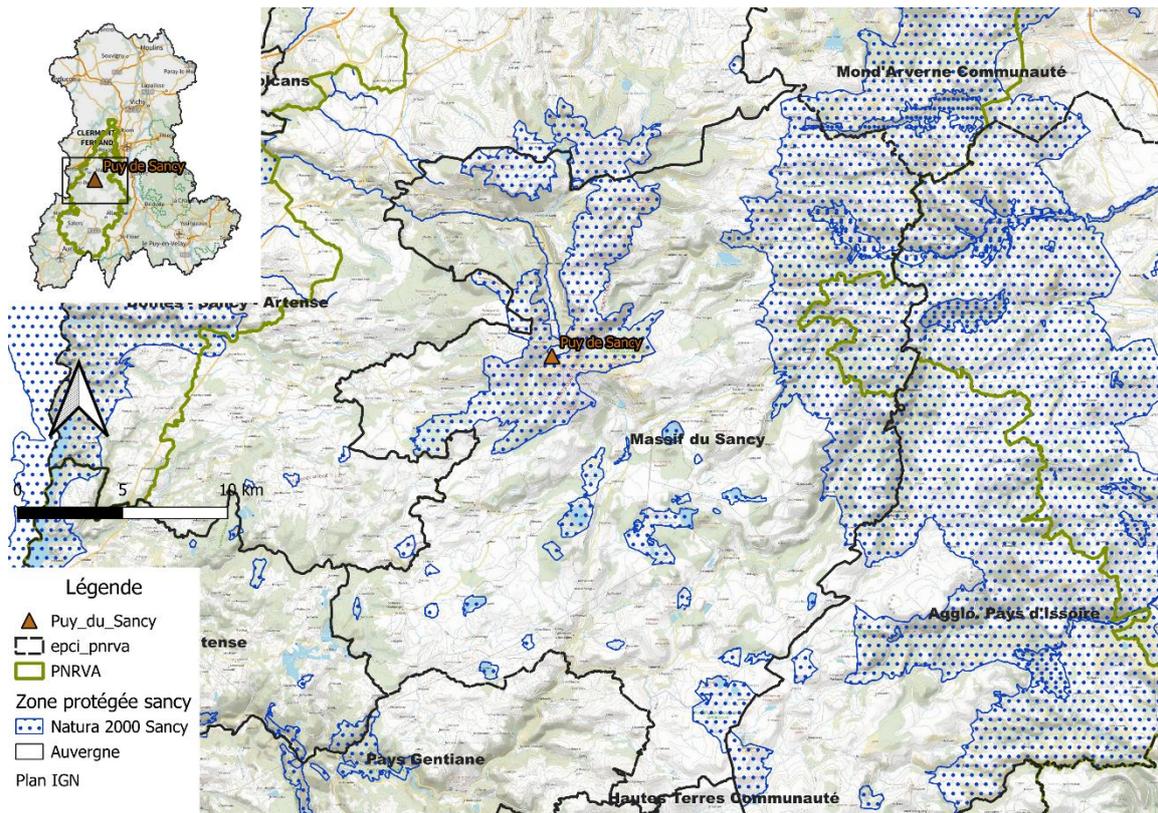
Annexe 3 : Représentation cartographique des ZICO sur le Massif du Sancy



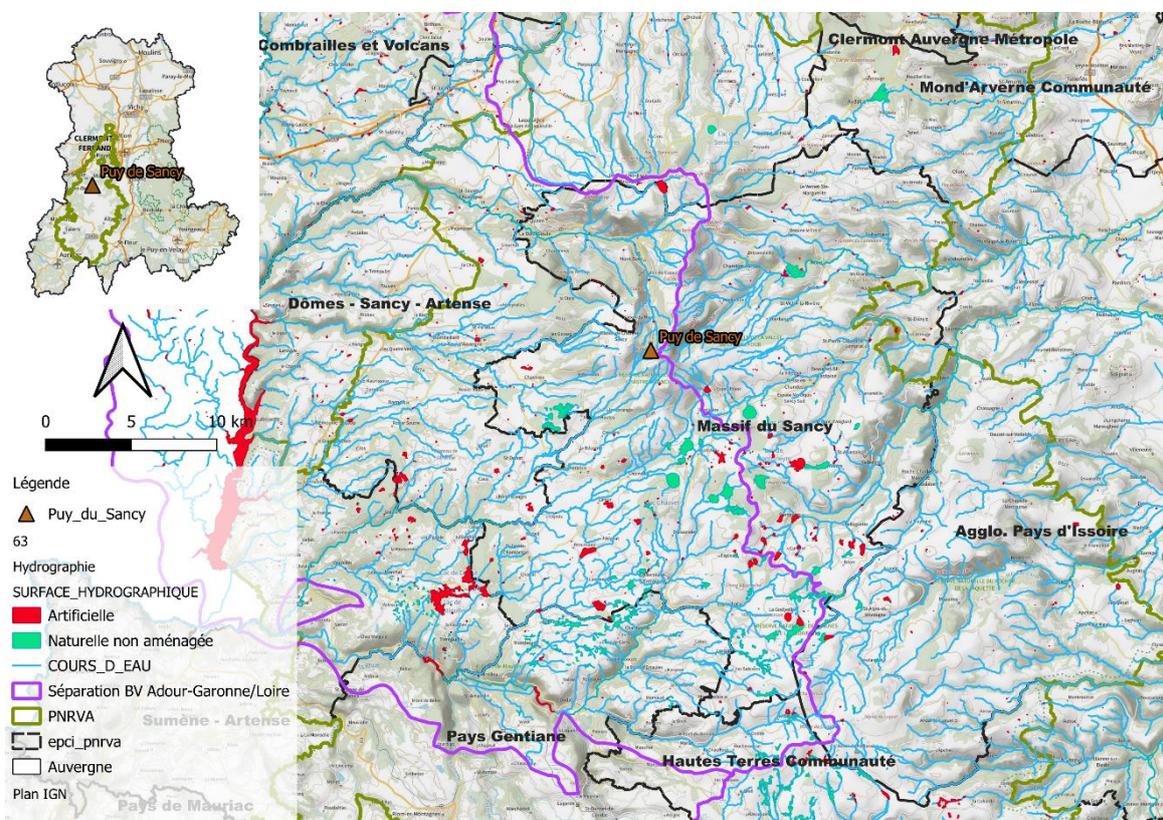
Annexe 4 : Représentation cartographique des ZNIEFF sur le Massif du Sancy



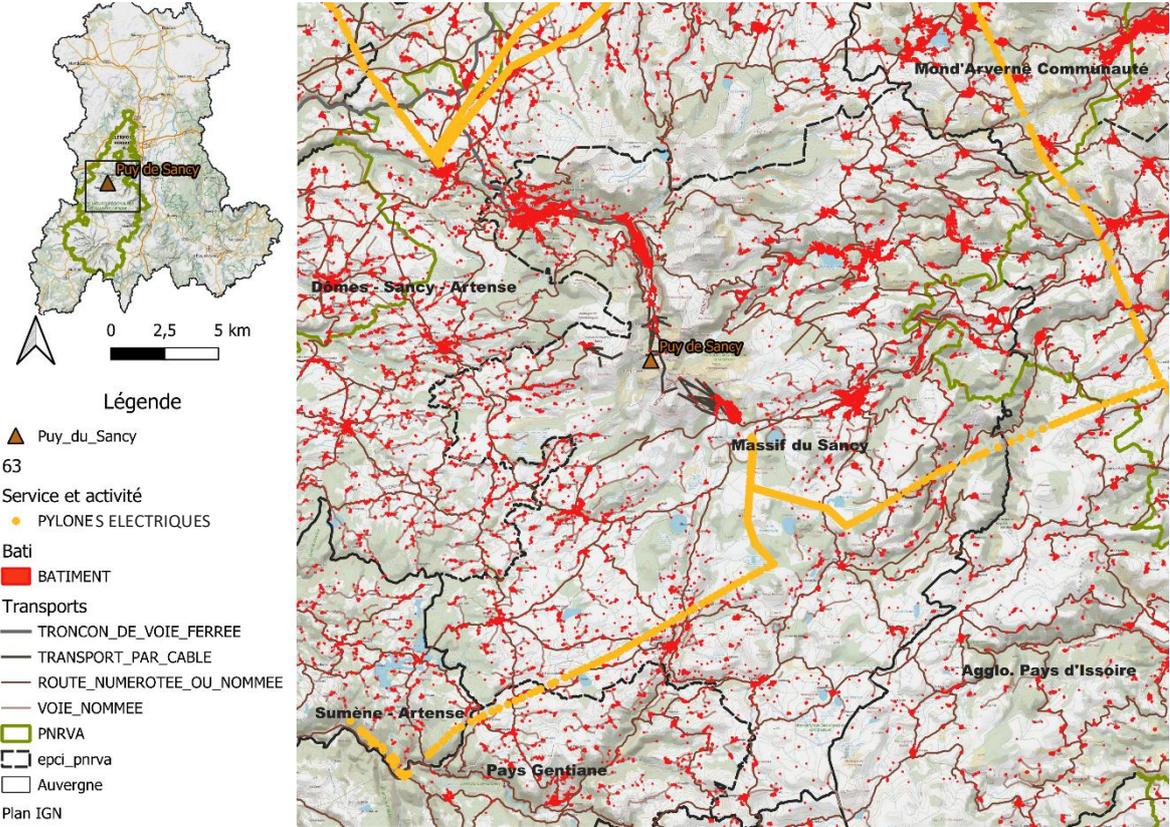
Annexe 5 : Représentation cartographique des zone Natura 2000 sur le Massif du Sancy



Annexe 6 : Représentation cartographique du réseau hydrologique sur le Massif du Sancy



Annexe 7 : Représentation cartographique des zones de transport et de bâti sur le Massif du Sancy



Annexe 9 : Aperçu de la base de données sentinelle écologique feuille 2 : Espèces

Entité	Nom latin	Taxonomie	Habitat	Statut particulier de l'espèce	Informations complémentaires	Menaces	Source 1 de l'entité
Crapaud calamite	<i>Epidalea calamita</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale, Espèces Patrimoniales		Destruction des habitats Pollution des eaux	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Crapaud commun	<i>Bufo bufo</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Nationale		Modification des régimes hydriques Destruction des habitats Pollution des eaux	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Grenouille agile	<i>Rana dalmatina</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale, Espèces Patrimoniales		Destruction des habitats Pollution des eaux	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Grenouille crouasse	<i>Rana temporaria</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale, Espèces Patrimoniales		Destruction des habitats Pollution des eaux	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Grenouille verte	<i>Pezomachus esculentus</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA), Espèce patrimoniale		Destruction des habitats Pollution des eaux	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Rainette méridionale	<i>Hyla meridionalis</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA), Espèce patrimoniale		Remonte en fonction du changement des conditions environnementales (fraicheur et humidité)	Sentinelle du Climat
Rainette verte	<i>Hyla arborea</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA), Espèce patrimoniale		Changement des conditions environnementales (fraicheur et humidité)	Sentinelle du Climat
Salamandre tachetée	<i>Salamandrina salamandrina</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale, Espèces Patrimoniales		Destruction des habitats Pollution des eaux	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Triton palmé	<i>Lissotriton helveticus</i>	Amphibien	Zones humides, cours d'eau	Protection Européenne, Nationale, Espèces Patrimoniales		Destruction des habitats Pollution des eaux	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Cyanobactérie	<i>Cyanobacteria</i>	Bactéries	Zones humides, cours d'eau		Bactérie qui prolifère dans l'eau en l'absence de préjudice humain et animal Pic de prolifération à cause de l'augmentation de température et apport d'N et de P en grande quantité	Apports de phosphore et d'azote en grande quantité Augmentation des températures	Cyanobactéries : un nouveau dispositif pour surveiller leur prolifération dans la rivière la Mayenne
Grande serotine	<i>Eptesicus serotinus</i>	Chiroptère (Chauve-souris)	Grottes, forêts, bâtiments	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA)		Perte d'habitat Dérangement humain, Pesticides, Maladies	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Grande noctule	<i>Myotis noctula</i>	Chiroptère (Chauve-souris)	Grottes, forêts, bâtiments	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA)		Perte d'habitat Dérangement humain, Pesticides, Maladies	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Murin de Bechstein	<i>Myotis bechsteinii</i>	Chiroptère (Chauve-souris)	Grottes, forêts, bâtiments	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA)		Perte d'habitat Dérangement humain, Pesticides, Maladies	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Noctule de Leisler	<i>Myotis leiberti</i>	Chiroptère (Chauve-souris)	Grottes, forêts, bâtiments	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA)		Perte d'habitat Dérangement humain, Pesticides, Maladies	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy
Peut rhinolophe	<i>Rhinolophus hipposideros</i>	Chiroptère (Chauve-souris)	Grottes, forêts, bâtiments	Protection Européenne, Nationale et Régionale (AURA)		Perte d'habitat Dérangement humain, Pesticides, Maladies	Plan de gestion 2022-2031. Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy

Annexe 10 : Aperçu de la base de données sentinelle écologique feuille 3 : Milieux

Entité	Localisation	Informations complémentaires	Menaces	Source 1 de l'entité	Page 1	Source 2 de l'entité	Page 2	Source 3 de l'entité
Etage subalpin	Crête du sancy	- Haute valeur patrimoniale	- Augmentation des températures - Baisse de la neige - Perte de biodiversité (espèce locale et endémique) - Banalisation des habitats - Arrivée d'espèces montagnardes - Augmentation de l'activité humaine (tourisme, pâturage) - diminution de la ressource en eau et en herbe sur les secteurs inférieurs	20240513_rencontre acteurs	Plan de gestion 2022-2031 Tome 1 - état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreik-Sancy	La Jasionne n°7 : Chastreik-Sancy Objectif 2031!		
Hétéralie-sapinière	Forêt	- Niche écologique riche	- Répétition d'événements extrêmes comme les sécheresses - Fragilités sanitaires - Adaptabilité des populations locale	20240513_rencontre acteurs	Plan de gestion 2022-2031 Tome 1 - état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreik-Sancy	La Jasionne n°7 : Chastreik-Sancy Objectif 2031!		
Landes composées d'arbrisseaux nains ou prostrés des étages alpin et subalpin, dominées par les Airelle	Landes composées d'arbrisseaux nains ou prostrés des étages alpin et subalpin, dominées par les Airelles	Landes alpines assez rases en pentes fortes à très fortes, exposées au nord et à l'ouest, de (1500) 1700 à 1860 m d'altitude : 9,8 ha (soit 0,14 % du site) - très grande richesse en plantes patrimoniales et protégées sur les crêtes rocheuses les plus hautes et les plus pentues (haut du val d'Enter, Cacaodogne, cascade de la Dore).	- Fréquentation touristique - fermeture des milieux par les ligneux - aménagement captivable d'eau	CARTE D'IDENTITÉ DU SITE FR8301042				
Landes composées d'arbrisseaux nains ou prostrés des étages alpin et subalpin, dominées par les Callunes	Landes composées d'arbrisseaux nains ou prostrés des étages alpin et subalpin, dominées par les Callunes	- localisées sur le sommet du Ferrand et dans une forme appauvrie sur les flancs du puy Gros : nombreuses plantes remarquables.	- Fréquentation touristique - fermeture des milieux par les ligneux - aménagement captivable d'eau	La Jasionne n°6 150 : Anticiper le Changement Climatique				
Landes sèches européennes	Landes sèches	Landes assez sèches à sèches en climat (sub)tropical, sur sols siliceux des plaines et basses montagnes, riches en bruyères, ajoncs, genêts...	- Fermeture du milieu par les ligneux - Enrichissement fongère-aigle - Tassement du sol (travaux) - fertilisation du sol	FR8301042	CARTE D'IDENTITÉ DU SITE FR8301042			
Pelouse montagnarde	Pelouse	- Héberge des espèces patrimoniales - Trame agropastorale de hautes terres d'auvergne	- Fauche et pâturage précoce - Remontée d'espèce d'altitude inférieur - Compétition des espèces qui remonte et des espèces qui habite - Changement de la composition floristique -EEE	20240513_rencontre acteurs	Plan de gestion 2022-2031 Tome 1 - état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreik-Sancy			
Plantation d'épicéas	Forêt		- Changement climatique - Sécheresse - Ravageur: Scolyte	20240513_rencontre acteurs	Plan de gestion 2022-2031 Tome 1 - état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreik-Sancy			
Réseau hydrographique	Massif du Sancy		- Evolution climatique - Quantité: Modification du régime pluvio-nival, baisse des débits, assec - Qualité: minéralisation possible,	20240513_rencontre acteurs				

Annexe 11 : Aperçu de la base de données sentinelle écologique feuille 4 : Ressources et Infrastructures

Entité	Type d'entité	Localisation	Informations	Ce qui les menacent (rupture)	Source 1 de l'entité	Page 1	Source 2 de l'entité	Page 2	Source 3 de l'entité
Eau potable	Ressources	Réseau hydrographique	Manque d'eau Eau contaminés	<ul style="list-style-type: none"> - Assèchement des sols et des sources superficielles - Potentielle accentuation de l'érosion des sols pourra fortement impacter la qualité des eaux. 	20240513_rencontre acteurs				
Herbe	Ressources	Prairie, pâturage		<ul style="list-style-type: none"> - Impact changement climatique - Périodes estivales plus sèche - Tension sur l'eau - Intersaison et des périodes 	20240513_rencontre acteurs		Plan de gestion 2022-2031 Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy		
Manteau neigeux	Ressources	Zone montagnarde, subalpine	Couverture neigeuse nécessaire au développement de certaines espèces Quantité de neige moins importantes Perte de couverture de manteaux neigeux	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation des températures - Perturbation des précipitations 	20240513_rencontre acteurs		Plan de gestion 2022-2031 Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy		Préserve la montagne : comment le Massif du Sancy se prépare au changement climatique
Sentier	Infrastructure	Crêtes	Infrastructure anthropique Entretien fort des sentier dans certaines zones (surtout Crêtes)	Erosion, impact sur la végétation, coût et maintenance augmentation de la superficie du sentier pendant les saisons estivales	Plan de gestion 2022-2031 Tome 1 : état des lieux de la réserve naturelle nationale de Chastreix-Sancy				

Annexe 12 Grille de sentinalité

Propriétés sentinelle	Description	Critère	Exemple
Potentielle sentinelle	Entités confrontées à des menaces ou à des changements environnementaux sur le territoire et identifier par la bibliographie	<ul style="list-style-type: none"> - Faire face à une menace - Etre présente sur le territoire d'études - Identification par les acteurs locaux et recherche bibliographique 	<p>Végétation indicatrice Phénomène météorologique</p> <p>ICI toutes les entités entrée dans la base de données</p>
Entité Sentinelle	Entité sentinelle dont des signaux face aux changements sont détectés	<ul style="list-style-type: none"> - Détection précoce des signaux environnementaux ou climatiques. - Identification de menaces pour les écosystèmes ou la santé humaine. 	<p>Animaux sensibles aux changements environnementaux,</p> <p>Lichens</p>
Dispositif technique	Équipements et technologies spécifiques dédiés à la surveillance environnementale.	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure et enregistrement ponctuel ou continue des paramètres environnementaux 	<p>Capteurs de qualité de l'air, drones de surveillance, stations météorologiques automatisées</p>
Communauté Sentinelle	Communautés scientifiques ou citoyenne utilisant des dispositifs de technique	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de dispositifs technique pour la surveillance des changements environnements - Mobilisation pour combler les écarts entre perceptions et réponses aux menaces - Intégration des connaissances locales et des stratégies de gestion. - Rôle stratégique dans la gestion des impacts environnementaux 	<p>Groupes locaux de surveillance environnementale</p> <p>Groupe de scientifiques</p> <p>Groupe associatif</p>
Dispositif Sentinelle	Système scientifique, administratif, social qui relie la production d'une alerte à des processus de décision	<ul style="list-style-type: none"> - Système d'alerte pour la détection des anomalies - Système de prise de décisions rapides pour réagir aux urgences - Système décisionnaire pour définir des stratégies d'adaptation - Relie preuves scientifiques aux processus décisionnels 	<p>Système d'alerte précoce</p> <p>Système d'urgence</p> <p>Système de gestion (plan d'adaptation)</p>
Organisation Sentinelle	Action collective réalisée par une communauté autour d'une menaces ou une rupture à partir d'un dispositif	<ul style="list-style-type: none"> - Processus collectif pour identifier et analyser les menaces/ruptures - Utilisation de dispositif technique ou sentinelle - Formation de communautés pour répondre aux menaces. - Arbitrage stratégique pour coordonner les réponses aux perturbations 	<p>Groupes de surveillance environnementale au sein d'organisations (LPO, PNR, RNN...)</p>
Poste Sentinelle	Lieux emblématiques et stratégiques pour la surveillance des changements environnementaux.	<ul style="list-style-type: none"> - Localisation permettant une bonnes visibilité des changements environnementaux - Accessibilité au grand public pour sensibiliser aux dangers imminents. - Importance historique et/ou géographique augmentant la visibilité des menaces. 	<p>Points de vue pittoresques</p> <p>Repères historiques</p> <p>Sites d'observation dédiés</p>
Territoire Sentinelle	Régions géographiques avec une dimension socio-économique entière particulièrement exposées aux impacts environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> - Position géographique aux avant-postes des changements écologiques - Présence de dispositifs d'observation pour la surveillance des changements - Association à une communauté engagée dans l'évaluation et la gestion des impacts - Construction progressive d'un territoire sentinelle à travers la détection, la sensibilisation publique, et la mobilisation communautaire - Transformation des changements en "problèmes sociaux" pris en compte par les institutions. 	<p>Zones montagneuses affectées par le recul des glaciers</p> <p>Iles menacées par la montée des eaux</p>
Sentinelles Territoriales	Entité sentinelle qui sert de repère aux changements dans un territoire spécifique pris en charge par les parties prenantes du territoire Elles ont toutes une dimension territoriale mais pas nécessairement une organisation, un dispositif ou des postes sentinelles	<ul style="list-style-type: none"> - Positionnement aux avant-postes des changements - Sensibilité accrue aux signaux précoces de perturbations écologiques, sociale... - Engagement dans la surveillance et la gestion locale des impacts - Possède une importance scientifique et sociale 	<p>Hypothèse dans le cadre du projet STar: campagne terrestre / Gentiane jaune....</p>



VetAgro Sup

BELLEMIN-BERTAZ Alexandra - Année 2023-2024,

Mémoire de fin d'études « *Analyse des signes de rupture écologique et identification des sentinelles écologiques de l'anthropocène dans le Massif du Sancy* », 39 pages, soutenu à VetAgro Sup (Lempdes), le 23/09/2024

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES :

- ◆ AgroParisTech Clermont-Ferrand
- ◆ Réserve Naturelle Chastreix-Sancy
- ◆ CPIE Clermont-Dômes
- ◆ Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne

ENCADRANTS :

- Maître de stage : Antoine Tardif (UniLaSalle Rennes) et Rebecca Etienne (AgroParisTech Clermont-Ferrand)
- Tuteur pédagogique : Adrien Pinot (VetAgro Sup)

OPTION : Agriculture, Environnement, Santé et Territoire (AEST)

RÉSUMÉ

Ce mémoire analyse les signes de rupture écologique et identifie les sentinelles écologiques de l'Anthropocène dans le territoire du Massif du Sancy, situé dans le Massif Central. La problématique est : Quelles sentinelles écologiques de l'Anthropocène peuvent être identifiées dans le Massif du Sancy en croisant littérature scientifique, données publiques, enquêtes de terrain et analyse cartographique ?

L'objectif de ce travail est de comprendre l'impact des activités humaines, telles que l'agriculture et le tourisme, sur ce territoire de moyenne montagne, affecté par le changement climatique, la pollution et la fragmentation des habitats. Dans le cadre du projet STar, une méthodologie transdisciplinaire a été développée pour identifier des sentinelles écologiques. En s'appuyant sur des recherches bibliographiques, une analyse cartographique du territoire et des entretiens avec des experts et des acteurs locaux, une base de données des sentinelles a été construite. Une grille d'évaluation du degré de sentinalité de ces des entités écologiques est proposée. Des exemples concrets comme le campagnol terrestre et les cyanobactéries sont également détaillés. La perspective de ce travail est de contribuer à sensibiliser et mobiliser les communautés locales face aux défis écologiques contemporains et futurs.

Mots clés : Rupture écologique, Sentinelles écologiques, Anthropocène, Territoire, Massif du Sancy

This document analyzes ecological disruption signs and identifies ecological sentinels of the Anthropocene in the Massif du Sancy territory. The central question is: Which ecological sentinels of the Anthropocene can be identified in the Massif du Sancy by the integration of scientific literature, public data, field surveys and inquiry, and cartographic analysis?

This study aims at understanding how human activities impact this mid-mountain region, affected by climate change, pollution, and habitat fragmentation. It is part of STar project which aims developing a transdisciplinary methodology to in order identify ecological sentinels. This work includes bibliographic research, ecological rupture mapping, expert interviews, and the creation of a sentinel's database. The study also proposes a framework to assess the sentinel degree of ecological entities, with concrete examples such as the common vole and cyanobacteria.

The final goal is to contribute to raising awareness and mobilizing local communities in response to contemporary ecological challenges

Mots clés : Ecological disruption, Ecological sentinels, Anthropocene, Territory, Massif du Sancy