

ORCHAMP

Observatoire spatio-temporel de la biodiversité
et du fonctionnement des socio-écosystèmes de
montagne



SOMMAIRE

1. Un outil de surveillance de la biodiversité.....	P.7
2. Un réseau de sites et d'acteurs.....	P.13
3. Des concepts scientifiques au service de l'observation.....	P.17
4. Des échelles emboîtées de suivi.....	P.23
5. Des méthodes pour répondre à des questions concrètes.....	P.29
6. Un fonctionnement coopératif.....	P.49
Bibliographie.....	P.54



L'observatoire spatio-temporel de la biodiversité et du fonctionnement des socio-écosystèmes de montagne (**ORCHAMP**), porté par le Laboratoire d'Ecologie Alpine (LECA), s'intéresse aux évolutions de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes alpins en réponse aux effets des changements globaux.



En s'appuyant sur de multiples outils d'observation, d'analyse et de modélisation, **ORCHAMP** permet de comprendre l'évolution de la biodiversité montagnarde à différentes échelles (du gène aux espèces, du microenvironnement à l'écosystème) et pour différents compartiments biologiques (la faune et la flore) sous l'effet des changements globaux (climatiques, utilisation des terres, pollution).





1. Un outil de surveillance de la biodiversité

Contexte

Les territoires de montagne offrent la particularité d'être à la croisée des chemins entre des vallées urbanisées à forte croissance, une déprise agricole en moyenne montagne, une activité touristique importante et des territoires préservés à haute altitude. Aussi, ce milieu est soumis à une forte variabilité topographique ainsi qu'à des gradients climatiques importants. Les Alpes françaises, couvertes par trois parcs nationaux, des parcs régionaux, d'importantes réserves naturelles et zones Natura 2000, sont aussi extrêmement diverses en matière de végétation (ex. : un tiers de la Flore française) et d'habitats. Elles offrent un territoire à de nombreuses espèces protégées ou réintroduites (ex. : le gypaète, le bouquetin) et soutiennent un nombre important de fonctions et services écosystémiques (ex. : ressource en eau, production fourragère, production sylvicole).

Par ailleurs, les territoires de montagne sont au cœur des changements globaux actuels et futurs. En effet, des études ont montré que la hausse des températures y est deux fois plus importante que la moyenne globale (Gobiet et al., 2014). Ces changements façonnent et vont fortement impacter la dynamique des biodiversités et des écosystèmes (Carlson et al., 2017). Il y a donc un besoin fort d'un outil qui permet de suivre, analyser et modéliser ces dynamiques afin de mieux adapter les politiques de gestion et de conservation en proposant une étude à grande échelle de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes qui structurent les paysages de montagne.

Pour répondre à cet enjeu, et en finir avec les stratégies d'observations ponctuelles et désorganisées, **ORCHAMP** a pour objectif de fédérer un ensemble de partenaires académiques de différents horizons disciplinaires et d'acteurs du territoire. Le principe fondamental de l'observatoire est de se positionner au niveau d'un ensemble de bassins-versants et de suivre leur dynamique spatio-temporelle afin d'étudier et comprendre comment les biodiversités et les écosystèmes répondent aux changements climatiques en interaction avec les usages.



Ces bassins-versants permettent de réaliser des suivis, à la fois de l'ensemble de la biodiversité (des bactéries aux vertébrés en passant par les insectes), d'un grand nombre de descripteurs d'habitats, et du fonctionnement des écosystèmes. Ces suivis sont réalisés par des experts (ex. : Conservatoires Botaniques Nationaux, Parcs Nationaux) et des chercheurs et ingénieurs des différentes structures académiques impliquées, appuyés sur le terrain par les gestionnaires de territoire ainsi que des agents de la protection de l'environnement.

Lancé en 2016, **ORCHAMP** a vu le jour dans les Alpes françaises ; dans un premier temps autour d'un réseau d'acteurs historiques autour de la Zone Atelier Alpes, rapidement rejoints par de nouveaux collaborateurs.

Suivant cette dynamique, le massif des Pyrénées va être intégré à l'observatoire à partir de 2021, sachant que l'ensemble des territoires de montagne de la France métropolitaine (des Pyrénées aux Vosges, en passant par le Jura, le Massif Central et la Corse) peuvent être inclus, ce qui permettrait de couvrir une plus grande diversité de milieux, et de contribuer pleinement aux réseaux de surveillance de la biodiversité terrestres nationaux et internationaux (ex. : GEO-BON).

Objectifs

L'objectif d'**ORCHAMP** est double :

- **Fédérer** les acteurs du territoire et de la recherche académique autour de l'**observation** de la biodiversité, du fonctionnement des écosystèmes, à long terme et au travers de multiples sites ;
- Permettre de la **recherche de haut niveau** basée sur la production de données en vue de la compréhension des socio-écosystèmes, et de leur fonctionnement, pour pouvoir prédire leur devenir face aux changements globaux.



L'action d'ORCHAMP se décline en 5 volets:

1. Observation

- Suivre la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes et des services écosystémiques associés.
- S'inscrire dans les démarches de suivi de la biodiversité à l'échelle nationale et internationale (ex : Suivi des Variables Essentielles de Biodiversité - EBV).

2. Méthodologie

- Améliorer la détection et l'assignation des espèces à partir des séquences d'ADN environnemental.
- Quantifier le fonctionnement des cycles biogéochimiques en place dans le sol en utilisant des approches enzymatiques.
- Quantifier et mesurer la diversité fonctionnelle et la structure spatiale de la végétation au cours du temps en utilisant des données satellitaires.
- Développer et tester des approches innovantes pour suivre la biodiversité.

3. Connaissance

- Développer des métriques et approches pour mesurer, quantifier et comprendre les relations entre environnement, biodiversité et fonctionnement des écosystèmes.
- Comprendre le rôle clé de certains organismes dans la structure spatiale et temporelle de la biodiversité multi-trophique.

4. Modélisation

- Prédire comment les modifications environnementales (ex. : pollution, déposition atmosphérique, changement climatique, changement d'utilisation des terres) influencent les assemblages multi-trophiques ou le fonctionnement des écosystèmes (cycle du carbone, azote) et des services associés.

5. Politiques publiques

- Apporter des indicateurs de la diversité, du fonctionnement, de l'évolution, et de l'état de conservation des écosystèmes aux gestionnaires d'espaces naturels, mais aussi aux collectivités, départements, régions et, à plus grande échelle, à l'Etat.
- Prédire les futures trajectoires des socio-écosystèmes en fonction de scénarios prospectifs.





2. Un réseau de sites et d'acteurs

Les principes du programme

L'observatoire **ORCHAMP** s'impose comme un outil permettant d'effectuer des suivis de biodiversité sur le terrain à différentes échelles imbriquées. Il fonctionne grâce à un réseau de plus d'une centaine de placettes permanentes, regroupées en différents gradients d'altitude, eux-mêmes disposés le long de versants.

Les bassins-versants étudiés et utilisés pour implanter les placettes permanentes ont été sélectionnés de manière à répondre aux différents questionnements de l'observatoire, tout en optimisant sa couverture spatiale et la représentativité des habitats montagnards et de leurs caractéristiques. Une trentaine de sites ont ainsi été sélectionnés, répartis sur l'ensemble du massif alpin français, illustrant les différences climatiques et pédologiques régionales, ainsi qu'un panel d'activités anthropiques.

Chaque gradient d'altitude établi sur un site (ou versant) présente un minimum de 4 placettes. Cette organisation permet une vision multi-échelles, avec plusieurs niveaux d'observation imbriqués : massif / bassin-versant / placette (*Figure 1*). Certaines zones ont également été identifiées comme des sites «Master», contenant plusieurs gradients d'observation sur une région restreinte, afin de mieux mesurer les variations locales. Trois masters sites sont présents à ce jour : la région du Mont-Blanc (vallée de l'Arve), le Grand Lautaret, ainsi que les trois massifs grenoblois, comportant tous au moins 3 gradients d'observation installés.

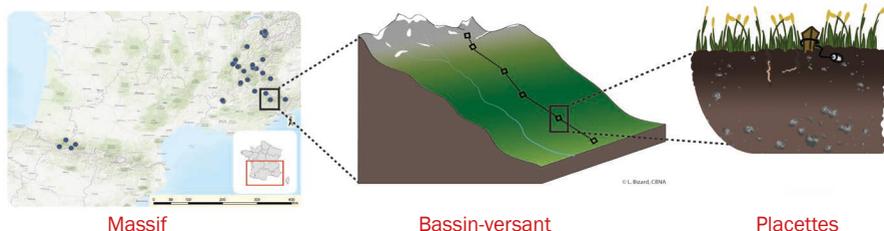


Figure 1: L'observatoire ORCHAMP : 3 échelles de suivis et d'analyse de données (source : L. Bizard, CBNA & T. Ubaldi, LECA)

Le suivi à long terme est assuré grâce à l'ensemble des partenaires locaux et aux différents experts académiques et non académiques. Un plan d'échantillonnage est établi et adapté en continu, afin d'assurer un ré-échantillonnage fréquent de chaque site (tous les deux à cinq ans). Les années d'échantillonnage, l'ensemble des protocoles obligatoires sont mis en œuvre sur les gradients sélectionnés.

Même quand aucun échantillonnage n'est prévu, l'ensemble des placettes permanentes sont contrôlées chaque année afin de documenter les éventuelles perturbations (ex. : labour de sanglier, arbres déracinés) et les pratiques de gestion en cours sur le site (ex. : pâturage, exploitation forestière). A cette occasion les agents de terrain réalisent également la récupération des données de température de sub-surface du sol.

Un programme qui s'inscrit dans une dynamique plus globale

Basé sur les principes du partage et de la coopération, l'observatoire **ORCHAMP**, animé par le LECA (Laboratoire d'Ecologie Alpine), repose également sur de nombreux partenaires : structures académiques, gestionnaires d'espaces protégés, experts et associations. L'ensemble de ce consortium est un espace de lien, de partage de compétences, de moyens et d'idées.

Soutenu par la **Zone Atelier Alpes**, **ORCHAMP** s'inscrit dans le projet **Sentinelles des Alpes** regroupant les différents dispositifs d'observation des relations climat-homme-biodiversité à l'échelle du massif alpin français. Depuis 2018, ces 5 dispositifs **ORCHAMP**, **Lacs Sentinelles**, **Flore Sentinelle**, **Refuges Sentinelles** et **Alpages Sentinelles**, (*Figure 2*) travaillent en synergie afin de définir une stratégie cohérente d'observation à l'échelle des Alpes françaises.



<http://www.za-alpes.org>

<http://www.za-alpes.org/-Sentinelles-des-Alpes-58->

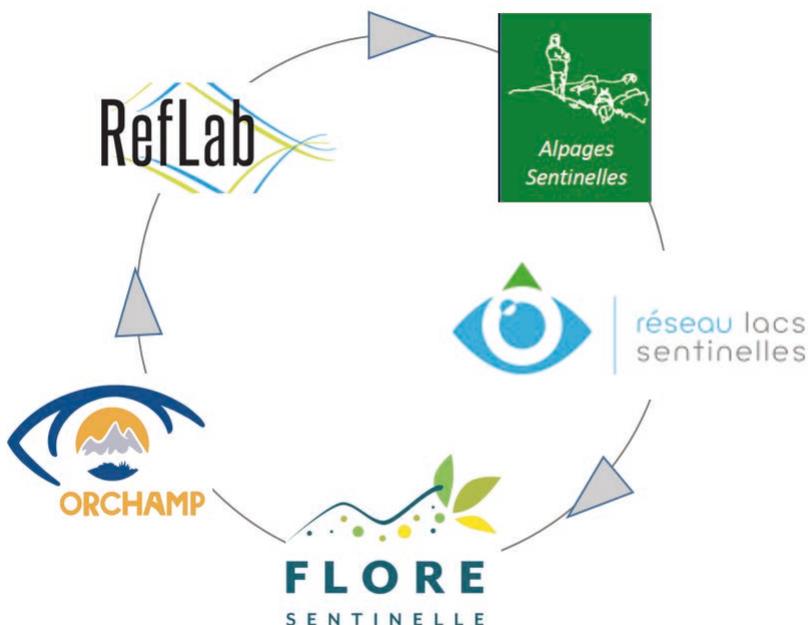


Figure 2: Les 5 programmes du projet Sentinelles des Alpes: ORCHAMP, Refuges sentinelles, Alpages sentinelles, Lacs sentinelles, Flore sentinelle (source: ZAA)

D'autre part, l'observatoire **ORCHAMP** a vocation à s'inscrire dans des démarches nationales du réseau de surveillance de la biodiversité terrestre de l'OFB (Office Français de la Biodiversité), mais aussi internationales avec le réseau d'observation de la biodiversité GeoBON (Biodiversity Observation Network) en participant localement à la collecte de données utilisables pour mener des analyses de l'état de la biodiversité à l'échelle mondiale.



3. Des concepts scientifiques au service de l'observation

Un observatoire...

Un observatoire est avant tout un outil qui permet de documenter au cours du temps, les caractéristiques et les trajectoires d'un ou plusieurs sujets d'étude spécifiques. Il se base sur un ou plusieurs protocoles, ainsi que sur plusieurs acteurs qui facilitent la pérennité du dispositif.

ORCHAMP est un observatoire de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes de montagne. Sa fonction primaire est d'observer, analyser et modéliser ces changements environnementaux. Il permet également de mutualiser et valoriser les connaissances des différents acteurs et partenaires, favoriser les échanges de données, et développer les synergies entre les acteurs du patrimoine culturel et de la gestion du territoire. **ORCHAMP** a donc pour but de donner une vue d'ensemble de l'évolution de la biodiversité en montagne, tout en partageant les résultats avec ses partenaires, mais également le grand public, sur son site internet :



<https://orchamp.osug.fr>

... de la biodiversité

Si la biodiversité s'observe à différentes échelles (individu, espèce, communauté, écosystème) et dans différents compartiments biologiques (la faune et la flore, aquatiques ou terrestres), elle est également mesurable de différentes manières qui permettent de caractériser ses différentes facettes. Ainsi, la diversité d'un milieu peut être détaillée selon six composantes : diversité spécifique, fonctionnelle, trophique, d'interactions, génétique et phylogénétique.



La diversité spécifique (ou taxonomique) correspond à la quantité ou la diversité d'espèces qui cooccurrent et coexistent sur un même site. Les relevés exhaustifs des botanistes réalisés sur les placettes permettent de caractériser la communauté végétale locale, composée d'organismes vivants partageant un environnement commun et qui interagissent avec ce dernier, mais aussi entre eux. Les relevés de type «points-contacts» apportent des informations supplémentaires sur la distribution de ces espèces en termes de proportions, et permettent de distinguer les espèces dominantes des espèces rares. Les approches d'ADN environnemental nous fournissent la diversité des communautés du sol (ex.: bactéries, champignons, nématodes, vers de terre...), la richesse ou la diversité de ces groupes, tandis que les approches acoustiques et de pièges photos nous fournissent la diversité faunistique épicée (e.g. oiseaux, orthoptères, grande faune).

La diversité fonctionnelle est calculée à partir des caractéristiques écologiques, morphologiques, phénologiques ou encore physiologiques des espèces qui vont expliquer leur succès et persistance dans la communauté et leurs effets sur le fonctionnement de l'écosystème.

La diversité fonctionnelle est définie comme l'éventail des valeurs de traits fonctionnels d'une communauté, qui peut prendre en compte ou non l'abondance des espèces.

La diversité trophique est très importante pour un observatoire comme **ORCHAMP** car elle va renseigner la diversité et la composition d'une communauté en termes de groupes trophiques. Chaque espèce appartenant à un groupe trophique particulier (ex.: prédateur, nématode bactérivores), on peut ainsi quantifier la richesse de groupes trophiques présents, et leur diversité au sein de chaque groupe.

La diversité d'interactions au sein de la communauté nous renseigne sur les échanges de matières entre espèces et groupes trophiques. Cela revient donc à quantifier les liens (ex.: prédation, parasitisme, etc.) entre groupes trophiques ou espèces et leur diversité.

La diversité génétique d'une communauté s'intéresse à la variabilité des gènes entre populations d'une même espèce. Elle décrit ainsi le niveau de la diversité intraspécifique.

Enfin, la diversité phylogénétique nous renseigne sur l'histoire évolutive accumulée d'une communauté, un peu comme un arbre généalogique.



... et du fonctionnement de l'écosystème

Dans n'importe quel milieu, forestier, marin ou alpin, les organismes vivent, consomment des ressources et interagissent, puis meurent : ils sont alors décomposés et recyclés. Le sol est donc un milieu de transformation de la matière, mais pas seulement, c'est également le support d'échanges avec les autres compartiments de l'écosystème. En effet, avec l'exemple des flux de carbone, lors de la dégradation des organismes morts, les décomposeurs relâchent du dioxyde de carbone ou CO₂, qui est ensuite dissipé dans l'atmosphère.

Enfin, si ces processus écologiques traduisent le fonctionnement et le maintien des écosystèmes, les services écosystémiques, eux, sont le résultat de ces processus.

La production d'oxygène par les végétaux, les organismes qui produisent et entretiennent l'humus ou encore l'activité des pollinisateurs dans les cultures sont des exemples de services. La stratégie nationale pour la biodiversité (SNB) les définit comme : «*l'utilisation par l'homme des fonctions écologiques de certains écosystèmes, à travers des usages et une réglementation qui encadrent cette utilisation*».

L'observatoire permet donc de calculer certains services ou fonctions rendus à l'homme comme le stockage du carbone, la productivité primaire ou la dégradation de la matière.



La valeur ajoutée d'ORCHAMP

En plus des observations réalisées sur le terrain, de nombreuses métriques mesurées à plus large échelle et issues de modélisations, d'analyses d'images satellites ou de cartographies anciennes sont utilisées dans le cadre des analyses. Ces données permettent de renseigner l'état actuel et passé des milieux, et permettent de suivre l'évolution de leurs conditions, avec des résolutions spatiales et temporelles fines.

L'ensemble des données et des connaissances produites selon ces approches multi-disciplinaires est mis à disposition de l'ensemble de la communauté scientifique, des gestionnaires et des partenaires impliqués dans l'observatoire au travers d'une base de données, visible sur le site internet. Regroupant pour chaque bassin-versant étudié des informations permettant de caractériser l'environnement, l'utilisation des terres, la biodiversité multitrophique et le fonctionnement de l'écosystème, ces données répondent au principe du FAIR data (Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables). Elles sont disponibles à l'ensemble du consortium, de la communauté académique et des territoires.

La production de données permettant de suivre les trajectoires des écosystèmes sur le long terme est basée sur le principe d'un ré-échantillonnage en panels rotatifs. Ainsi, la mise en place de suivis standardisés et répétables permet d'étudier les dynamiques temporelles des communautés le long des gradients altitudinaux en réponse, ou non, à une perturbation. Le ré-échantillonnage des placettes est réalisé en moyenne tous les 4-5 ans, même si le panel rotatif fait que cela varie au cours du temps (ex.: un gradient peut être ré-échantillonné deux années d'affilée, même si sur le temps long, il le sera en moyenne tous les 4 ans).

ORCHAMP permet aussi de développer et tester des approches innovantes pour suivre la biodiversité comme les suivis de pollinisateurs par ADN, les mesures acoustiques ou pièges photo. L'observatoire s'inscrit donc dans une démarche de Recherche et de Développement active.

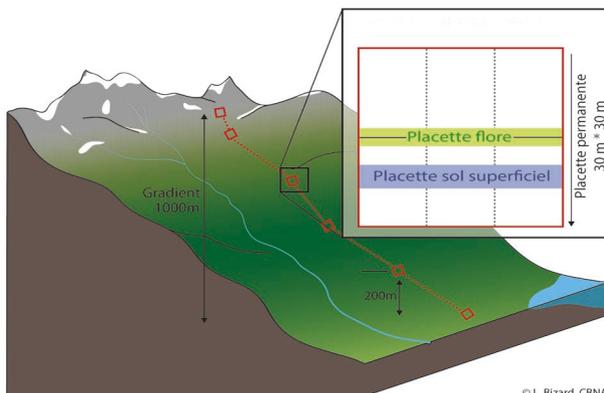


4. Des échelles emboîtées de suivi

Des suivis du bassin-versant aux placettes permanentes

Un bassin-versant est caractérisé à la fois dans son ensemble, grâce à la topographie et aux outils de télédétection (Thierion et al., 2017), mais aussi le long d'un (ou plusieurs) gradient continu d'altitude, au sein duquel le climat, l'usage, la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes sont suivis de manière standardisée. Sur chacun de ces gradients d'environ 1000 mètres de dénivelé, des placettes permanentes sont positionnées et équipées, espacées entre elles d'environ 200 mètres de dénivelé ($\sim 1^\circ\text{C}$ de différence). Ces placettes mesurent 30 x 30 mètres et sont divisées en sous-placettes, afin de délimiter les différents protocoles de suivis tout en limitant la perturbation générée lors des phases d'étude de terrain (Figure 3).

L'une des spécificités d'**ORCHAMP** est de combiner sur ces placettes, des suivis traditionnels (ex. : relevés forestiers, relevés botaniques), ainsi que des suivis de dernières générations (ex. : ADN environnemental, activités enzymatiques, et à l'avenir paysage acoustique et pièges photographiques), qui permettent d'obtenir un grand nombre de descripteurs du site, allant des micros aux macro-organismes, et ce pour tout l'écosystème. Ces différents outils et techniques sont mis en œuvre, soit sur l'ensemble de la placette (comme les relevés forestiers), soit sur des sous-placettes (comme les relevés botaniques, ou les prélèvements d'ADN environnemental).



© L. Bizard, CBNA

Figure 3: Description d'une placette permanente. (source: L. Bizard, CBNA)

Un socle commun de suivis

Un plan d'échantillonnage des placettes permanentes est établi et adapté en continu, afin d'assurer un ré-échantillonnage fréquent de chaque site (tous les deux à huit ans). Les gradients et bassins-versants d'observation sont suivis selon des protocoles standardisés et communs, auxquels certains protocoles spécifiques peuvent s'ajouter, distinguant ainsi deux types de suivis :

- les protocoles obligatoires, socle commun d'**ORCHAMP**, mis en œuvre sur l'ensemble des sites ;
- les protocoles optionnels, qui peuvent être réalisés sur un ou plusieurs gradients, durant une ou plusieurs années, au gré des projets et en concertation avec les acteurs du territoire concerné. Cela concerne aussi des aspects recherche et développement pour des tests de protocoles, d'approches ou d'outils.

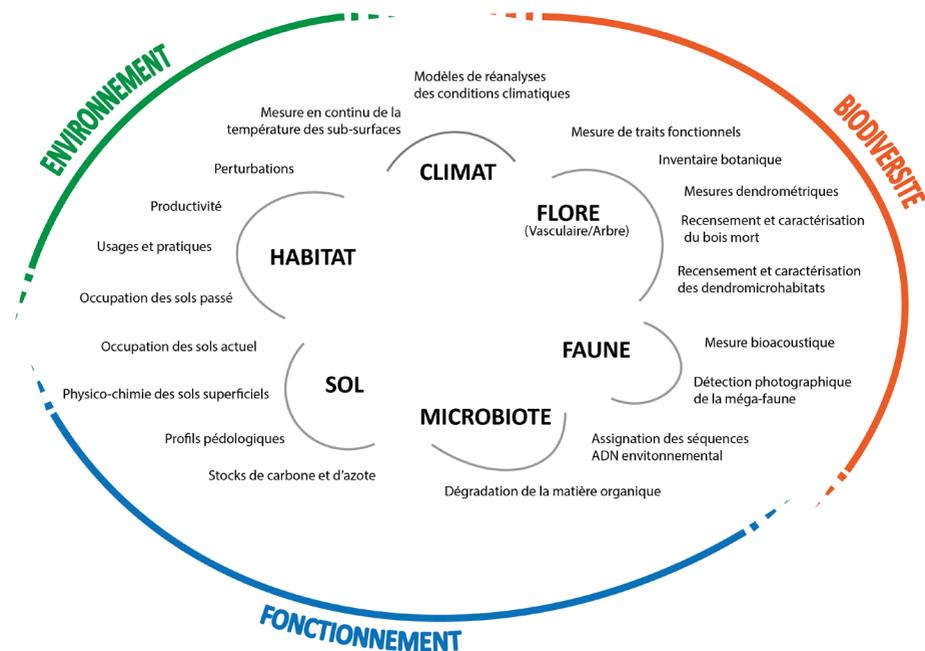


Figure 4: Présentation des protocoles obligatoires et optionnels effectués au sein de l'observatoire. (source: C. Mahieu, LECA)

Données mesurées, variables et indicateurs

Les données d'**ORCHAMP** peuvent être utilisées pour calculer des variables à visée plus large, comme les variables essentielles de biodiversité ou EBV (Essential Biodiversity Variables). Ces variables sont utilisées pour structurer le suivi de la biodiversité à l'échelle mondiale, harmoniser et normaliser les données provenant de sources hétérogènes (Vihervaara et al., 2017 ; Pereira et al., 2013). Les ECV (Essential Climate Variables) et les ESV (Essential Soil Variables) sont les équivalents des EBV, mais pour les données de climat et de sol, et peuvent également être mobilisées pour compléter la diversité des indicateurs de l'observatoire (*Figure 5*).

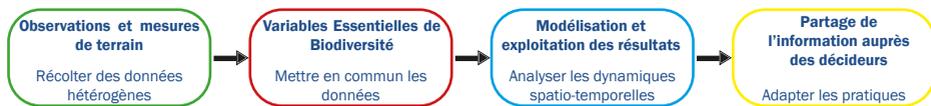


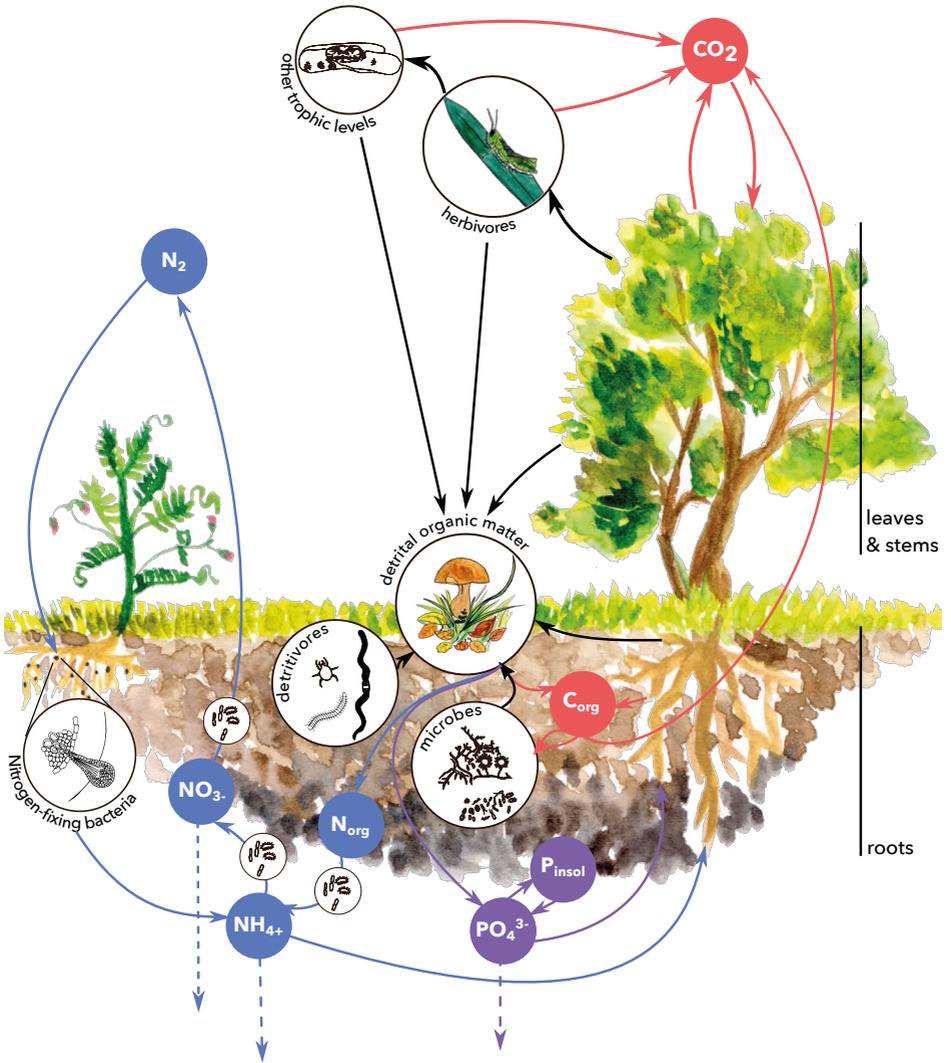
Figure 5: Des observations de terrain à l'adaptation des pratiques en passant par les EBV.



Le tableau 1 liste une partie des variables essentielles de biodiversité ou EBV qui peuvent être obtenues à partir des données produites par l'observatoire **ORCHAMP**. Cette liste n'est pas exhaustive, mais permet de montrer la diversité des mesures réalisées.

Catégorie	Indicateur	Données	Mise en œuvre sur ORCHAMP
Populations	Aire de répartition	Présence d'espèces sur les placettes	Inventaires de biodiversité : dont inventaire exhaustif de la végétation, recensement des essences forestières, assignations des séquences d'ADN environnemental à des espèces...
	Abondance	Abondance des espèces sur les placettes	Suivis des communautés : dont données d'abondance de la végétation issues du protocole points contacts ; fréquences des séquences d'ADN environnemental dans chaque échantillon de sol
Traits	Traits physiologiques	Traits fonctionnels des plantes	Mesurés pour la majorité des espèces végétales recensées sur les placettes
Communautés	Diversité taxonomique	Richesse et diversité (Shannon ou Simpson) au travers de groupes taxonomiques et trophiques	Suivis des communautés de plantes (relevés botaniques) et du sol (ADN environnemental)
	Interactions	Quantité et diversité des groupes trophiques potentiels	Combinaison de données d'ADN environnemental, de plantes et de données sur la biologie des espèces
Fonction des écosystèmes	Productivité	Production Primaire Nette	Données satellitaires à l'échelle du bassin-versant (ex.: NDVI)
Structure des écosystèmes	Fragmentation et étendue	Degré de fragmentation des écosystèmes (par des barrières naturelles ou anthropiques)	Indicateurs paysagers, spatialisés issus du traitement des images satellites
	Composition en groupes fonctionnels	Définition d'unités de végétation ayant des caractéristiques fonctionnelles de productivité similaires	

Tableau 1: Synthèse des données et des indicateurs mesurés au sein d'ORCHAMP



Associations plantes-sol au coeur des cycles biogéochimiques, (source : C. Matinez-Almoyna, LECA)



5. Des méthodes pour répondre à des questions concrètes

Un état des lieux des écosystèmes au cours du temps

La biodiversité dans son ensemble

La biodiversité d'un écosystème se définit par sa flore, son microbiote et sa faune. Deux grands types d'outils sont utilisés dans l'observatoire **ORCHAMP** pour mesurer la composition, les caractéristiques et l'évolution de la flore : ceux concernant la végétation herbacée, et ceux concernant la forêt. Pour ce qui est du microbiote et de la faune, son observation est elle aussi divisée en deux protocoles, l'un ciblant le microbiote et la faune du sol (micro et macro-faune), et l'autre la macro-faune et méga-faune terrestre (e.g. oiseaux, insectes volants).

Flore : Définir la composition et la structuration végétale de la placette

L'étude de la composition et de la structuration de la placette permet d'observer l'évolution de l'abondance des espèces au cours du temps. Pour cela, on effectue le suivi de l'ensemble de la végétation sur l'ensemble des sites. Ce protocole est divisé en deux parties, réalisées toutes deux au même moment et sur la même sous-placette lors du ré-échantillonnage d'un site.

L'inventaire exhaustif recense toutes les espèces végétales présentes (hormis les mousses) sur chaque placette sur un transect de 3m de large et 30m de long (au milieu de la placette), et ce quelle que soit leur abondance. Il permet de définir le «pool» (ou liste) d'espèces présentes localement le long du gradient d'altitude. La revisite des sites fait ressortir l'évolution de la composition de ce pool, dans le temps et dans l'espace.



Les relevés type «points contacts» sont réalisés sur une ligne de lecture (1.5m de large) de 30 m traversant chaque placette (*Figure 6*). Le recensement des espèces présentes à intervalles réguliers (tous les 20 centimètres) le long de cette ligne permet d'établir un profil de recouvrement et d'abondances relatives des espèces sur la placette.

Ce protocole met en valeur les espèces dominantes qui vont avoir un impact significatif sur la structuration et le fonctionnement de l'écosystème local. Les revisites permettent de mesurer les variations des abondances, mais également les changements de dominance.



Figure 6 : Relevé botanique au Vieux-Chaillo, 2016 (source: LECA)

Flore : Dynamique forestière et le bois comme support de biodiversité

Les suivis de dynamique forestière et de bois permettent de rendre compte de la régénération et la croissance des forêts et de leur adaptation face aux changements climatiques et d'en faire un lien avec la biodiversité environnante qui en dépend.

Une adaptation du protocole PSDRF (Protocole de Suivi Dendrométrique des Réserves Forestières) est utilisée pour effectuer le suivi des arbres vivants sur chaque placette d'observation. L'identification des espèces d'arbres, la mesure de leur diamètre (*Figure 7*) et le relevé de leur position géographique sont réalisés sur trois sous-placettes. Ce protocole donne une indication du recouvrement forestier de chaque placette, ainsi que de la limite de la flore arborée le long de chaque gradient d'altitude. La revisite des sites permet de suivre les tendances à long terme de changement de structure et de composition des forêts.



Figure 7: Photo d'une mesure de diamètre, Réserve du Lauvitel, 2018 (source: INRAE)



Figure 8: Photo de la mesure de diamètre d'un billon, plan de l'Aiguille, 2018 (source: INRAE)

Par ailleurs, le recensement du bois mort est réalisé sur une partie des gradients **ORCHAMP** (Figure 8). Leur type (sur pied ou au sol), leur diversité et leur stade de décomposition représentent de bons indicateurs de la biodiversité forestière saproxylique (c'est-à-dire qui réalise tout ou partie de son cycle de vie dans le bois en décomposition).

Enfin, les dendro-microhabitats (singularités portées par les arbres, comme des décollements d'écorce, des cavités ou des carpophores de champignons) sont recensés. Ces particularités du bois peuvent représenter des éléments déterminants de la structure et de la bio-complexité des écosystèmes forestiers.

Ces deux grands types de protocoles optionnels permettent de décrire la biodiversité végétale qui structure l'écosystème et sert de support et de milieux de vie pour d'autres organismes. Ainsi, les végétaux ont un véritable rôle fonctionnel au sein de l'écosystème.



Figure 9A : Echantillonnage d'ADN du sol, 2020 (source: PNM)

Microbiote et faune du sol : L'étude de l'ensemble de la biodiversité d'un monde caché

Décrire la composition et l'abondance des espèces présentes dans un sol n'est pas aisée. D'une part en raison de la diversité d'espèces et de la diversité de tailles des organismes ; d'autre part du fait de la nature même d'un sol : un milieu plein et compact au travers duquel il n'est pas possible de «voir».

Le trait d'union entre les organismes vivants est qu'ils sont tous constitués d'une ou plusieurs cellules contenant de l'ADN. Tout au long de leur vie, les êtres vivants laissent des cellules mortes dans leur milieu, qui vont libérer des fragments d'ADN, qui se fixent sur les particules de sol. La récolte d'échantillons de sol et le séquençage de l'ADN qui s'y trouve permettent alors d'identifier les espèces qui y sont ou y ont été présentes.



Figure 9B : Extraction de l'ADN du sol (source: PNM)

Une fois les prélèvements réalisés sur chaque sous-placette, cette identification se déroule en quatre étapes. Dans un premier temps, les échantillons de sol sont mis en solution afin de séparer les molécules d'ADN. Ces fragments vont ensuite être amplifiés par PCR et séquencés. Pour finir, on compare ces données à celles de base de références pour assigner aux séquences d'ADN le nom de l'espèce à laquelle elles appartiennent (*Figure 10*). Le microbiote et la faune du sol étant principalement composés de groupes d'espèces encore mal décrits (bactéries, champignons, arthropodes...), les séquences sont souvent assignées à des rangs taxonomiques supérieurs (famille, genre).

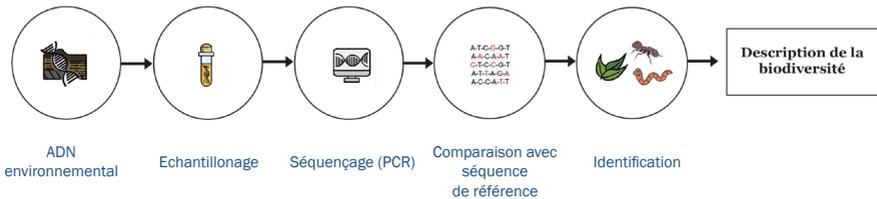


Figure 10: Description de la biodiversité à partir de l'ADN environnemental. (source: T. Ubaldi et C. Mahieu, LECA)

Faune épigée : Les nouvelles technologies font évoluer notre façon de suivre la faune

La faune épigée peut-être collectée de différentes manières. Les points d'écoute, les collectes au filet, etc. Dans **ORCHAMP** et compte tenu de l'ampleur du déploiement, ces protocoles restent rares ou spécifiques sur un sujet particulier. Toutefois, de nouvelles techniques existent pour étudier une faune épigée qui peut être tout aussi difficile à observer : faible taille de population, activité diurne, déplacement furtif ou aérien, etc. Il s'agit d'outils technologiques mélangeant capteurs de mouvement, appareil photo ou encore enregistreurs audio.

Dans le cas des pièges photo, des capteurs de mouvements automatiques déclenchent l'appareil photo au passage de l'animal (*Figure 11*). On peut ainsi effectuer des relevés sans besoin de manutention pendant par exemple toute une saison. Le «piège» acoustique est aussi utilisé afin d'enregistrer le son sur une période donnée par jour, et ce, sur plusieurs mois. Sons, vidéos ou photos sont ensuite récupérés, stockés et triés, à l'aide d'outils statistiques faisant appel à des méthodes d'intelligence artificielle, ou tout simplement «à la main».



Figure 11: Image d'un chamois capturée au piège photo. (source: CREA)

ORCHAMP ne comprend pas encore de protocole obligatoire concernant l'observation de la faune épigée. Toutefois, des projets connexes utilisent ce genre d'outil sur certains gradients de l'observatoire. Ils nous permettent notamment d'identifier les espèces présentes dans un milieu particulier, d'étudier leur dynamique de populations et d'estimer leur nombre d'individus.

Plusieurs tests sont en cours sur **ORCHAMP** pour voir si ce sont des protocoles qui pourraient être généralisés sur l'ensemble des placettes à moyen terme.



Le fonctionnement à toutes les échelles

Au-delà d'une simple description de diversité d'espèces présentes dans l'écosystème, nous cherchons à aller plus loin en nous intéressant aussi au fonctionnement global de l'écosystème, notamment au travers de l'étude du sol.

Profils pédologiques : *Composition et structuration du sol*

Lors de la mise en place d'un nouveau gradient, la réalisation d'une fosse pédologique (ou profil de sol) permet d'établir une description globale du sol (profondeur, âge, roche dominante...), et des descriptions plus détaillées de chaque horizon (ou couche) qui le compose. Le sol est en effet un élément complexe et il est impossible de comprendre le fonctionnement des écosystèmes sans considérer le sol dans son ensemble (profondeur, composantes minérales, organiques et biologiques).



Figure 12: Réalisation d'une fosse pédologique. (source: EDYTEM)

On creuse une parcelle d'environ un mètre carré et on récupère le sol appartenant à chaque couche distincte jusqu'à parvenir, si possible, à la roche mère (Figure 12). Les horizons morphologiquement homogènes sont décrits et échantillonnés. Les sols sont ensuite analysés selon le protocole RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) au laboratoire d'analyse des sols d'Arras. Pour chaque

horizon on dispose alors des caractérisations physiques (granulométrie, densité, capacité de réserve en eau, pourcentage de cailloux) et chimiques (pH, C, N, P biodisponible ; Capacité d'échange des cations, aluminium échangeable).

Par ailleurs, des analyses spectroscopiques plus poussées permettent de mesurer des éléments clefs de l'État des sols : état d'altération des roches, traces de métaux lourds et de polluants organiques, nature et degré de stabilité des matières organiques. Des stocks de carbone organique ou de polluants sont ainsi mesurés pour chaque profil. Compte tenu des protocoles utilisés, les données obtenues sont comparables à celles produites dans le réseau RMQS.

Ces valeurs mesurées sur des sols décrits permettent ainsi d'établir une "carte d'identité des sols" des gradients **ORCHAMP**. Des indices de "qualité des sols" par rapport à différents services rendus sont en cours d'élaboration pour synthétiser cette donnée pédologique.



Activités enzymatiques & physico-chimie du sol : Comprendre le fonctionnement de l'écosystème uniquement à partir du sol

Lorsqu'un organisme meurt ou qu'une fraction de celui-ci se dépose au sol, la matière organique dont il est constitué est décomposée, soit par des processus physiques, soit par des organismes décomposeurs. Ils dégradent la matière organique par l'intermédiaire d'enzymes excrétées dans le milieu (et donc désignées comme des exo-enzymes). Les nutriments qui en résultent sont stockés puis recyclés. Ce processus s'inscrit dans les grands cycles biogéochimiques qui se déroulent au moins en partie dans le sol, et contribue au fonctionnement de l'écosystème au travers de ces transformations.

Des échantillons de sol sont utilisés pour caractériser ce fonctionnement. On réalise des mesures de l'activité enzymatique extracellulaire (AEE) excrétées par les décomposeurs en ciblant les enzymes spécialisées dans la dégradation des cycles du carbone, de l'azote et du phosphore. Des substrats artificiels sont ajoutés aux échantillons de sol. Ils libèrent une molécule qui devient fluorescente une fois découpée : un spectrophotomètre permet alors de mesurer la quantité et l'efficacité des exo-enzymes contenues dans un sol et qui interviennent dans la décomposition de la matière organique (*Figure 13*). Ces différentes mesures et analyses donnent ainsi des indications sur la vitesse du processus de recyclage et sur les flux de CO₂ produits.



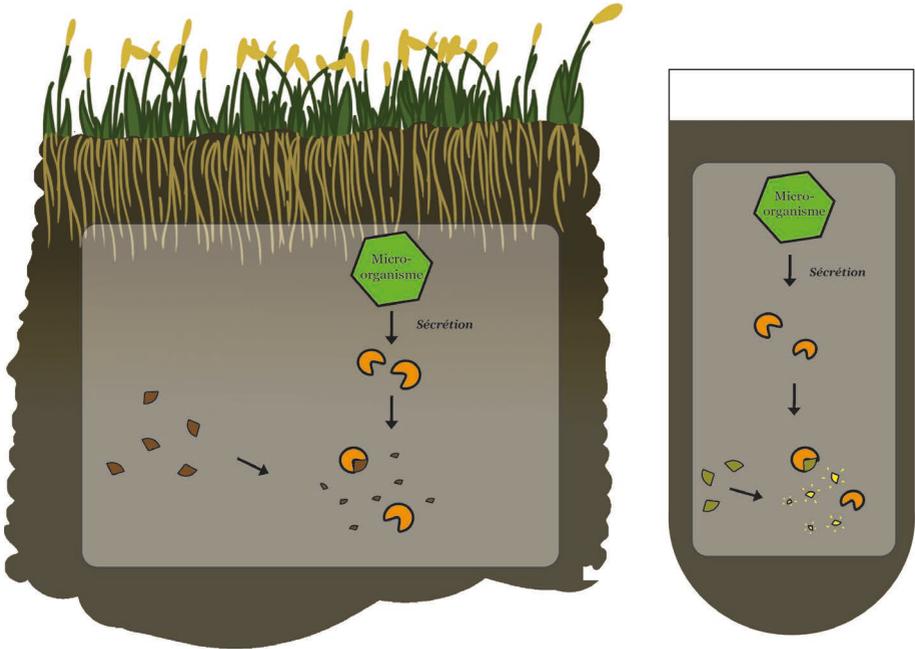


Figure 13: Comprendre le fonctionnement de l'écosystème grâce à la mesure de l'activité potentielle des enzymes extracellulaires. A gauche: les micro-organismes naturellement présents dans le sol sécrètent des exo-enzymes qui dégradent les molécules organiques. A droite: utilisation du processus précédent en intégrant des substrats qui deviennent fluorescents lorsqu'ils sont découpés par les exoenzymes. C'est en mesurant cette fluorescence qu'il est possible de quantifier l'activité de dégradation des enzymes. (source: T. Ubaldi et C. Mahieu, LECA)

Légende

-  Molécule organique
-  Substrat
-  Exoenzyme





CO₂ : Le sol régule, à long terme, la quantité de CO₂ atmosphérique

Lors du découpage et du recyclage de la matière organique dans les écosystèmes terrestres, les décomposeurs relâchent du carbone dans l'atmosphère principalement sous forme de dioxyde de carbone. Cette production de CO₂ s'intègre dans le cycle du carbone, l'un des cycles biogéochimiques le plus important sur Terre. Dans les écosystèmes terrestres, le carbone est stocké, entre autres, dans le sol, mais aussi dans la biomasse. Le bilan carbone (carbone stocké ou relâché) est une donnée fondamentale. Il est en effet très important de déterminer si, en relation avec les changements en cours (climatiques et d'usage), le sol et les écosystèmes de montagne sont des puits (bilan positif pour le stockage du carbone) ou des sources (bilan négatif) de CO₂ pour l'atmosphère.

Au sein d'**ORCHAMP**, le stockage du carbone organique dans le sol et la biomasse est étudié et quantifié. Le but est de mesurer les stocks constitués de carbone et de quantifier la dynamique des différents pools de carbone constitué dans le sol afin de pouvoir prévoir la dynamique long terme du carbone. Cela est possible notamment en étudiant l'activité enzymatique des micro-organismes en lien avec la stabilité des matières organiques accumulées.

Le protocole mis en place comprend une phase de mesure des stocks proche de celle du protocole RMQS (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de l'INRAE). Il présente également une phase d'analyses spectroscopiques poussées des matières organiques des sols stockés (Jolivet et al., 2006).

...et une caractérisation physique

Si biodiversité et fonctionnement représentent respectivement les acteurs et les interactions qui peuplent un écosystème, il reste cependant à décrire l'environnement dans lequel évoluent ces êtres vivants qui vont influencer les processus qui les relie.

Climat

Réanalyses climatiques : Utiliser les modèles météorologiques pour caractériser le climat

Bien que la plupart des observations et des protocoles d'**ORCHAMP** soient réalisés à l'échelle locale de la placette, les conditions climatiques qui s'y trouvent proviennent de processus qui se réalisent à une échelle supérieure. C'est pour cette raison que les modèles météorologiques sont calculés à une échelle régionale, correspondant ici à celle des bassins-versants.

On utilise des modèles de réanalyses climatiques SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) CROCUS-ISBA, développés par le Centre d'Etude de la Neige (CEN), qui fournissent des cartes de températures, précipitations solides et précipitations liquides à un pas de temps horaire pour l'ensemble des Alpes françaises. Ce modèle combine des mesures réelles et des modèles statistiques, afin de reconstituer des projections spatiales passées et actuelles. Ces projections futures se basent sur les différentes projections du GIEC construites à partir de différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.



Mesure T° du sol : Développer un réseau de mesure directe comme outil de validation des modèles climatiques

Afin de vérifier la qualité de ces modèles climatiques, on installe des capteurs de température HOBO sur chaque placette. Ils sont installés dans le sol, afin de suivre l'évolution de la température du sol superficiel à un pas de temps horaire. Ils sont remplacés chaque année, afin de récupérer leurs mesures qui seront ensuite comparées aux sorties des modèles SAFRAN.

Cette méthodologie nous permet donc d'obtenir d'une part des données climatiques basées sur des observations réelles, mais réduites (les capteurs de température autonomes), et d'autre part de vérifier la fiabilité de ces modélisations sur nos sites d'intérêt.

Phénologie

Séries MODIS : Caractériser la dynamique de végétation via l'imagerie satellitaire pour mieux détecter les changements de productivité

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est un indice sensible à la vigueur et à la quantité de végétation : autrement dit, il s'agit d'un proxy de la productivité d'un milieu.

Différents capteurs et satellites permettent d'obtenir des valeurs de NDVI. Les capteurs MODIS sont une série d'instruments d'observation optique embarqués dans un système satellitaire. Parmi les "produits" délivrés par ces capteurs, une valeur de NDVI à une résolution spatiale de 250 m et temporelle de 8 jours est disponible sur l'ensemble du globe.

Cet indice nous permet d'identifier les différences de productivité entre différentes placettes d'un même gradient altitudinal, mais également d'informer sur la durée de la saison de croissance et sur les différences de démarrage de la végétation entre sites ou placettes.

Paysage et occupation du sol

Cartes d'état-major : Retracer l'évolution du couvert forestier

Les cartes d'états-majors du XIX^e siècle (*Figure 14*) sont les premières tentatives de représentation du relief plus ou moins rigoureuses, ce qui en fait des cartes de grande qualité. Leur superposition avec les cartes actuelles permet notamment de retrouver l'évolution de l'emprise des forêts et des villes depuis cette époque, et ainsi l'évolution de l'expansion urbaine et de l'exploitation forestière.

Ces informations nous permettent de mieux comprendre l'environnement actuel et les communautés qui le composent et, plus spécifiquement, essayer de comprendre l'effet de ces pratiques passées sur la composition actuelle des communautés.

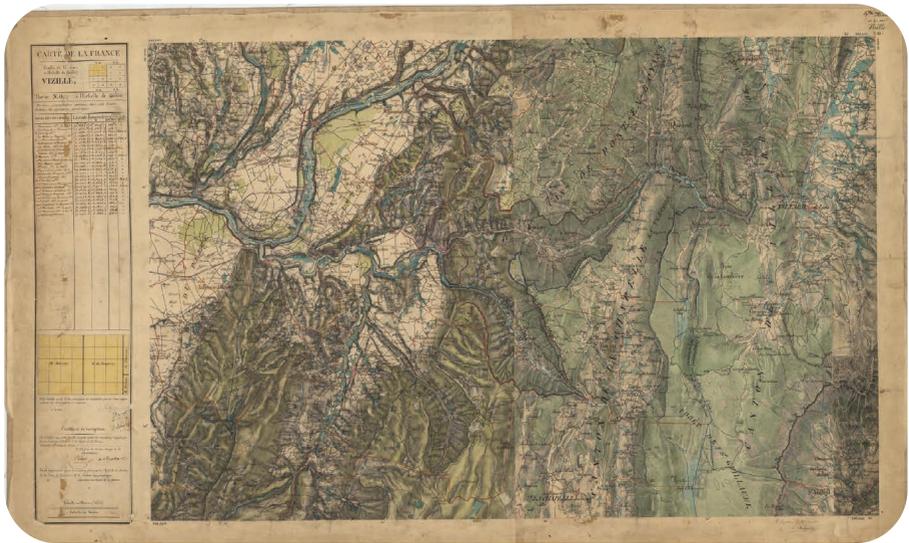


Figure 14: Carte d'état-major "Vizille", échelle: 1/40000, 1866 (source: IGN France)

Occupation du sol : *L'imagerie satellitaire ou télédétection comme outil de cartographie*

L'analyse d'images satellites permet d'observer et de décrire la terre «à distance». En analysant ces images, il est possible de les classer selon des typologies définies afin de réaliser des cartes d'occupation du sol. Par le biais de ces méthodes, une telle carte est disponible à l'échelle de l'ensemble du territoire national. C'est celle issue du laboratoire CESBIO que l'on utilise dans le cadre d'**ORCHAMP**. Ces cartes d'occupation du sol sont mises à jour chaque année.

Elles nous permettent d'analyser les changements d'usage anthropique et les dynamiques paysagères (recolonisation forestière, fermeture des milieux ouverts, urbanisation des surfaces...).



Pratiques pastorales : *L'homme participe au façonnement du paysage et a une influence sur l'écosystème*

Parmi les pratiques anthropiques qui peuvent avoir une influence sur les écosystèmes de montagne suivis dans l'observatoire, le pastoralisme est l'une des plus importantes.

La taille, la nature (bovin, ovin) et les habitudes (périodes de pâture, fréquence) des troupeaux sont autant de paramètres à prendre en compte dans la dynamique et l'évolution des paysages.

Chaque année, nous revisitons l'ensemble des sites **ORCHAMP** en complétant une grille de raclage : il s'agit d'indiquer, pour chaque placette, s'il y a eu passage d'herbivores (domestique ou non) et quelles sont les traces visibles de ce passage (altération du milieu, niveau de consommation de la végétation, etc.). L'indice obtenu permet de mesurer la pression qu'exercent les grands herbivores sur la végétation.

Par ailleurs, sur certains sites, des études sociologiques et l'exploration de publications anciennes nous permettraient de suivre et de caractériser l'évolution de ces pratiques pastorales dans le passé.

...pour une meilleure modélisation à toutes les échelles

Toutes ces données et observations peuvent être combinées afin d'étudier l'évolution de la biodiversité et de son fonctionnement au cours du temps et dans l'espace.

Modèles de distribution d'espèces : Prédire la répartition des êtres vivants

Les relations statistiques qui peuvent être mises en évidence entre la distribution ou l'abondance d'une espèce ou d'un groupe d'espèces et l'environnement peuvent être utilisées pour calculer la probabilité de présence de cette espèce dans les zones non échantillonnées.



Par exemple, l'observatoire **ORCHAMP** peut estimer la distribution potentielle en bactéries sur l'ensemble des Alpes françaises. Ces approches connues sous le nom de modèles de distribution d'espèces ou modèles de niche sont très utilisées pour établir des cartes de distributions d'espèces au travers de l'espace. Les approches statistiques employées peuvent aussi être adaptées dans un contexte plus général de diversité, ou de diversité fonctionnelle. (Figure 15)

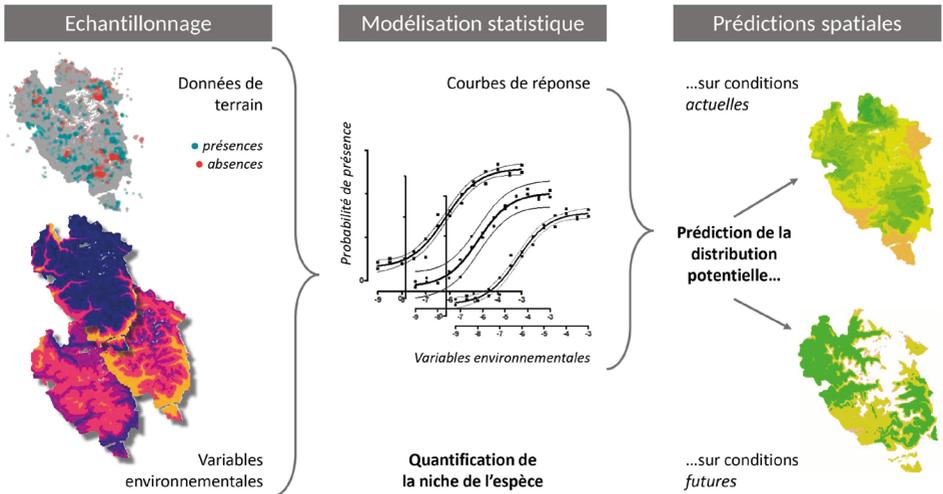


Figure 15: Modélisation schématique de la niche d'une espèce (Source: M. Guéguen, LECA)





6. Un fonctionnement coopératif

Le consortium ORCHAMP

L'observatoire **ORCHAMP** est coordonné par Wilfried Thuiller, directeur de recherche CNRS au laboratoire d'Écologie Alpine de Grenoble (Univ. Grenoble Alpes-CNRS-Univ. Savoie Mont Blanc), avec l'aide d'Amélie Saillard, ingénieur d'étude à l'Univ. Grenoble Alpes, chargée de mission et d'animation du projet. Cet observatoire repose sur un réseau très actif de partenaires académiques, des gestionnaires d'espaces protégés et de territoires et experts.

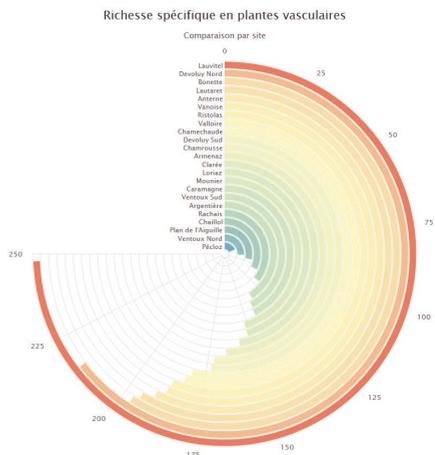
Mobilisation des données

Toutes les données récoltées dans le cadre d'**ORCHAMP** peuvent être mobilisées lors de la rédaction de plans de gestion ou de conservation de la biodiversité. Une partie des données sont en accès libre, les autres sont disponibles sur simple demande aux responsables du programme :



orchamp@univ-grenoble-alpes.fr

Dans un effort de produire des rendus synthétiques et de participer au suivis mondiaux. L'observatoire **ORCHAMP** participe au suivi des Variables Essentielles de la Biodiversité qui seront déclinées par plot et gradient, au cours du temps au gré des échantillonnages successifs. Avec l'augmentation progressive du nombre de gradients échantillonnés, les outils de la modélisation permettront de faire des cartes de ces EBV.



Coûts et financements

Les thématiques de recherche et de développement d'outils de gestion utilisant les données de l'observatoire sont nombreuses et variées, il n'est donc pas possible de prédéfinir les coûts liés à ces thématiques. Cependant, les coûts liés aux mesures de terrain nécessaires à la réalisation du volet observatoire sont plus facilement quantifiables.

Les tarifs ci-dessous, sont donnés à titre indicatif pour un gradient de 6 placettes permanentes. Seuls les protocoles obligatoires du socle commun sont inclus. Le coût global inclut le salaire des différents experts (botanistes, laborantins et gestionnaires de données) dont une partie du travail peut être transférée à des agents de terrain après formation. Le coût des consommables et réactifs est donné à titre indicatif et n'inclut en rien le travail d'analyse réalisé en laboratoire.

	Coût global	dont consommables et réactifs
Mise en place du gradient et premiers échantillonnages	42.5 k€	6.5 k€
Année sans échantillonnage (surveillance seulement)	0.7 k€	0 k€
Année de revisite (en moyenne tous les 4 ans)	25 k€	4 k€



Financeurs



Partenaires

Académiques :



Conservatoires Botaniques Nationaux :

Conservatoire Botanique National



Conservatoire Botanique National



Conservatoire Botanique National



Gestionnaires d'espaces protégés, de territoires et autres relais locaux :



Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture



Massif des Bauges
Géoparc mondial UNESCO



Tutelles



L'ensemble des partenaires d'**ORCHAMP** contribuent à la mise en œuvre et au financement de l'observatoire au travers de leur participation aux campagnes de terrain ; de leur implication dans des groupes de travail thématiques et de leur contribution au financement de l'observatoire.

Bibliographie

Carlson, B.Z., Corona, M.C., Dentant, C., Bonet, R., Thuiller, W., Choler, P., 2017. Observed long-term greening of alpine vegetation—a case study in the French Alps. *Environ. Res. Lett.* 12, 114006.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa84bd>

Jolivet, C., Arrouays, D., Boulonne, L., Ratié, C., Saby, N., 2006. Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS) - Etat d'avancement et premiers résultats. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 13 (3), 149- 164 (EGS_13_3_jolivet.pdf (afes.fr))

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014. 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of The Total Environment* 493, 1138–1151.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>

Pereira, H.M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G.N., Jongman, R.H.G., Scholes, R.J., Bruford, M.W., Brummitt, N., Butchart, S.H.M., Cardoso, A.C., Coops, N.C., Dulloo, E., Faith, D.P., Freyhof, J., Gregory, R.D., Heip, C., Hoft, R., Hurtt, G., Jetz, W., Karp, D.S., McGeoch, M.A., Obura, D., Onoda, Y., Pettorelli, N., Reyers, B., Sayre, R., Scharlemann, J.P.W., Stuart, S.N., Turak, E., Walpole, M., Wegmann, M., 2013. Essential Biodiversity Variables. *Science* 339, 277–278.

<https://doi.org/10.1126/science.1229931>

Thierion, V., Herrault, P.-A., Vincent, A., Inglada, J., Sheeren, D., 2017. Utilisation des séries temporelles d'images Sentinel-2 pour la cartographie de l'occupation du sol dans un contexte de modélisation de la biodiversité, 1-31. hal-02738272

Vihervaara, P., Auvinen, A.-P., Mononen, L., Törmä, M., Ahlroth, P., Anttila, S., Böttcher, K., Forsius, M., Heino, J., Heliölä, J., Koskelainen, M., Kuussaari, M., Meissner, K., Ojala, O., Tuominen, S., Viitasalo, M., Virkkala, R., 2017. How Essential Biodiversity Variables and remote sensing can help national biodiversity monitoring. *Global Ecology and Conservation* 10, 43–59.

<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.01.007>

Auteurs : Amélie Saillard (LECA), Chloé Mahieu (LECA), Maya Guéguen (LECA), Jérôme Poulénard (EDYTEM), Sophie Labonne (INRAE), Yoan Paillet (INRAE), Julien Renaud (LECA), Wilfried Thuiller (LECA)

Relecture : Louise Boulangeat (LECA), Bertrand Liénard (CBNA), Sylvain Abdulhak (CBNA), Jérôme Poulénard (EDYTEM), Léa Bizard (CBNA)

Crédits images : CBNA, CREA, INRAE, LECA, Sylvain Abdulhak (CBNA), Gilbert Billard, Carole Birck (ASTERS-CEN74), Alain Bloc (RNN Ristolas), Claudia Defrasne (EDYTEM), Luc Garraud (CBNA), Maya Guéguen (LECA), Sophie Labonne (INRAE), Marie-France Leccia (PNM), Jérôme Manson (PNM), Yoan Paillet (INRAE), Giovanni Poggiato (LECA), Jérôme Poulénard (EDYTEM), Julien Renaud (LECA), Amélie Saillard (LECA), Wilfried Thuiller (LECA), Jean-Gabriel Valay (Jardin du Lautaret)

Conception et réalisation graphique : Emilie Ratajczak (CBNA), Avril, 2021

Avec le soutien de la DREAL PACA pour l'édition



