



ORION : biOdiveRsity Impacts of shrub expansiON in the Chamonix valley



Rapport final
31/08/2023



Table des matières

À propos	2
I. Introduction	3
Contexte et enjeux.....	3
Objectifs du projet.....	4
II. Méthodes	5
La cartographie des habitats.....	5
Validation de la carte des habitats.....	8
Campagne de terrain été 2022.....	8
Indicateurs de diversité floristique et faunistique en lien avec les landes....	9
III. Résultats techniques	10
La cartographie des habitats.....	10
Validation de la carte d’habitat.....	14
Implications de l’expansion des landes pour la faune et la flore.....	15
<i>Indicateur de diversité floristique</i>	15
<i>Indicateurs d’habitat favorable du chamois et du lièvre variable</i>	16
IV. Perspectives pour la gestion et la conservation	19
Identification des zones à fort enjeux dans la vallée de Chamonix.....	19
<i>Les alpages</i>	19
<i>Les réserves naturelles</i>	21
Vers des cartes saisonnières d’habitat occupé par la faune sauvage.....	23
V. Conclusion : la carte ORION, un nouvel outil pour le suivi du territoire	24
VI. Communication autour du projet ORION	26
VII. Remerciements	27
VIII. Bibliographie	28
IX. Annexes	28

À propos

Auteurs

Brad Carlson^{1*}, Arthur Bayle^{2*}, Marjorie Bison¹, Célia Bonnet-Ligeon^{1*} & Anne Delestrade¹

¹Centre de Recherches sur les Ecosystèmes d'Altitude (CREA Mont-Blanc), Observatoire du Mont-Blanc, 67 lacets du Belvédère, Chamonix-Mont-Blanc 74400, France

²Laboratoire d'Ecologie Alpine (LECA), UMR UGA-USMB-CNRS 5553, Bâtiment D, 2233 Rue de la Piscine, 38610 Gières



www.creamontblanc.org

*contact@creamontblanc.org



www.leca.osug.fr

*arthur.bayle.env@gmail.com

Pour citer ce rapport

Carlson B., Bayle A., Bison M. & Delestrade A. *ORION : biOdiveRsity Impacts of shrub expansiON in the Chamonix valley*. Projet financé par l'Office français de la biodiversité (OFB) dans le cadre du Space Climate Observatory (SCO) France, 2021-2023. Septembre, 2023, 33 p.

septembre, 2023

I. Introduction

Contexte et enjeux

Alors que la limite supérieure de la forêt est très étudiée et surveillée depuis de nombreuses années, **la distribution des ligneux bas (ou landes) dans les Alpes est souvent mal prise en compte dans la cartographie et dans la gestion des milieux de montagne**¹. Or les landes de la famille des Ericaceae représentent aujourd'hui un habitat structurant et parfois dominant de la couverture végétale en montagne, et leur extension au détriment des prairies peut conduire à un certain nombre de « disservices écosystémiques ». Le remplacement des prairies par des landes risque i) d'entraîner localement une baisse de la diversité floristique², ii) de modifier les ressources végétales et l'habitat disponibles pour les herbivores³ sauvages et domestiques et iii) de modifier les paysages du point de vue du touriste et du randonneur. Ces dernières années dans les Alpes, on soupçonne une forte expansion des landes^{4,5}, qui aurait été favorisée à la fois par le réchauffement climatique induisant une réduction de la durée d'enneigement⁶, mais également par l'abandon du pastoralisme en faveur du tourisme.

Le massif du Mont-Blanc est un site emblématique des effets du changement climatique dans les Alpes⁷. Au même titre que la fonte des glaciers et du permafrost en haute montagne, l'érosion de la biodiversité constitue une conséquence critique du réchauffement climatique à surveiller du point de vue de la gestion territoriale et de la conservation. Selon l'INPN⁸, un tiers de la flore des milieux ouverts d'altitude (prairie, lande et combe à neige) est considéré comme menacé dans la région, à cause de la modification des habitats et du réchauffement climatique. **Les landes représentent un habitat particulièrement dominant dans la vallée de Chamonix**, et depuis les années 1970 et grâce aux photos aériennes, nous observons une expansion importante des ligneux bas dans les milieux alpins (Figure 1). Les prairies de montagne sont devenues de plus en plus rares et fragmentées, isolées entre la forêt, les landes et les parois de haute montagne.

Afin de préserver et de gérer les milieux ouverts d'altitude et la biodiversité qui y est associée, **les gestionnaires locaux ont exprimé leur besoin d'outils pour suivre l'évolution spatio-temporelle de ces habitats. Le constat partagé est une absence de prise en compte des images satellites** dans la définition de leur stratégie de gestion de la biodiversité du fait (i) d'un manque de finesse des produits proposés pour être opérationnel (e.g. carte OSO du THEIA, produits Copernicus ; Figures 1, A1) et (ii) d'un manque de mise à disposition, de synthèse sous forme d'indicateur et d'accès aux outils produits par la communauté scientifique.

La mise en service de nouveaux satellites comme Sentinel-2 offre aux scientifiques et aux gestionnaires du territoire la possibilité d'améliorer les suivis spatio-temporels des milieux de montagne⁹, grâce à une meilleure résolution spectrale, spatiale et temporelle de cette nouvelle génération d'images. Une étude récente menée par notre équipe a démontré le potentiel de Sentinel-2 pour détecter l'accumulation des pigments anthocyanes au cours de l'automne dans les landes dominées par les Ericaceae¹, permettant ainsi d'affiner les cartes d'occupation du sol en

faisant la distinction entre les landes et les prairies. En parallèle, nous avons mis en place un réseau de « pièges photo » dans la vallée de Chamonix, qui fournit un outil efficace en complément des images satellites pour observer la fréquentation des habitats de montagne par la faune sauvage¹⁰.

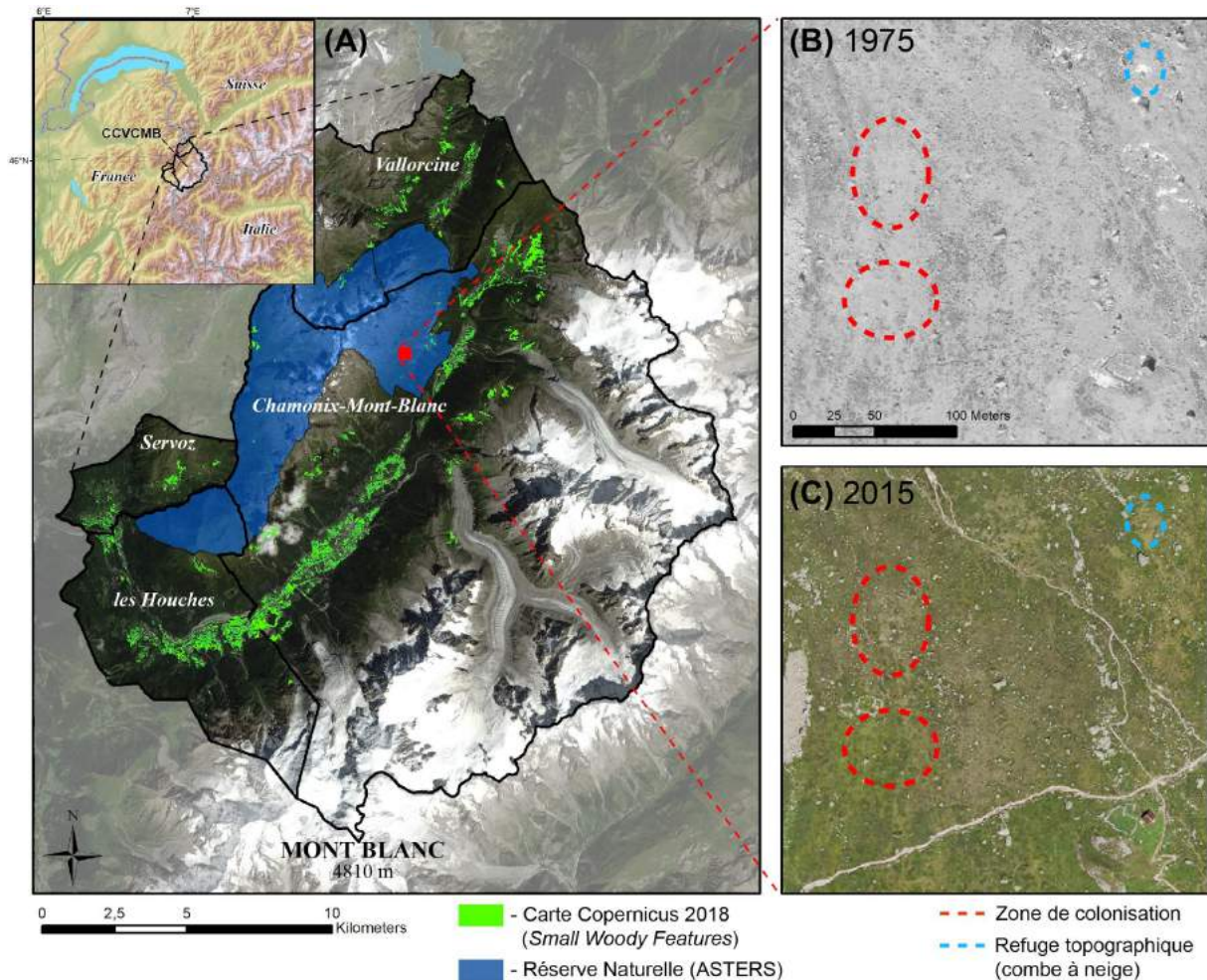


Figure 1. (A) Carte de la zone d'étude centrée sur la Communauté de Communes de la Vallée de Chamonix Mont-Blanc (CCVCMB), et qui montre la distribution des *Small Woody Features* proposée par Copernicus au niveau européen. La cartographie proposée ne correspond pas à la distribution des landes et des ligneux bas présents dans les milieux ouverts supra-forestiers. Les panels (B) et (C) montrent des photos aériennes du secteur du Lac des Chéserys dans les Aiguilles Rouges à Chamonix, datant de 1975 et 2015. On distingue clairement la forte expansion des landes aux dépens des prairies (ellipses rouges et par ailleurs), sauf dans certains contextes particuliers comme par exemple un creux de combe à neige (ellipse bleue).

Objectifs du projet

Le projet ORION vise à valoriser ces avancées méthodologiques récentes avec l'objectif de fournir des services opérationnels aux décideurs pour les aider à gérer l'expansion des landes et plus généralement la dynamique des habitats (forêt, lande, prairie) sur leur territoire. Nous proposons une approche multi-trophique pour appréhender les conséquences de la fermeture des prairies sur la diversité floristique et sur la disponibilité d'habitat pour la faune sauvage et

domestique (pâturage). Nous fournirons aux décideurs des outils spatialement explicites qui peuvent être renouvelés et mis à jour régulièrement dans les années à venir, grâce à la disponibilité continue des images satellites. Concrètement, nous avons prévu de produire : (i) une cartographie haute résolution de la distribution des milieux (forêt, lande, prairie, rocher et sol nu) réalisée à partir d'images satellites et validée par des observations au sol - **WP1**, (ii) des indicateurs de diversité floristique et de fréquentation de la faune sauvage, en fonction de la couverture des landes - **WP2**, et (iii) des cartes de zones à fort enjeux où la dynamique des landes est particulièrement importante à surveiller - **WP3**. L'ensemble de ces outils, y compris des cartes interactives, seront intégrés dans l'**Atlas du Mont-Blanc**, une plateforme web qui vise à partager les résultats des travaux scientifiques réalisés dans le massif du Mont-Blanc avec les décideurs et le grand public - **WP4** (Figure 2).

Pour réaliser ce travail, nous avons mis en place un partenariat entre le Centre de Recherches sur les Ecosystèmes d'Altitude (**CREA Mont-Blanc**), une ONG basée à Chamonix spécialisée dans le lien entre la recherche scientifique en écologie et les décideurs, et le Laboratoire d'Ecologie Alpine (**LECA**), laboratoire de l'université Grenoble Alpes et de l'université Savoie Mont Blanc. Nos travaux sont à destination des techniciens et des décideurs de la Communauté de Communes de la Vallée de Chamonix-Mont-Blanc (**CCVCMB**) et également des gestionnaires des réserves naturelles en Haute-Savoie et dans la vallée de Chamonix (**Asters**). Pour mener à bien ce projet, nous avons mis en place des échanges réguliers avec les partenaires scientifiques ainsi que les gestionnaires et les décideurs concernés par le projet.

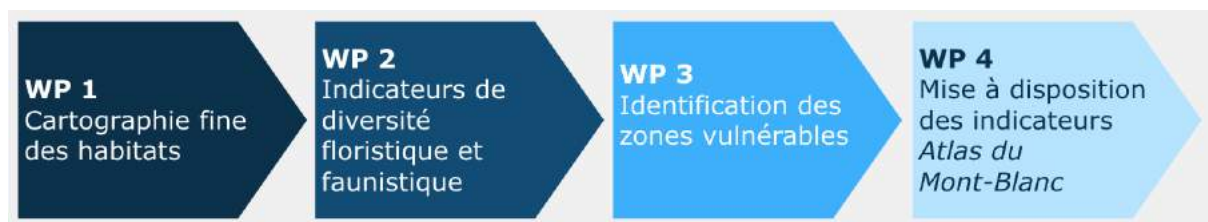


Figure 2. Schéma des quatre Work Packages du projet.

II. Méthodes

La cartographie des habitats

Points de calibration

La première phase du projet a consisté à définir une typologie des classes d'habitat représentatives de la vallée de Chamonix et suffisamment distinctes d'un point de vue spectral pour être différenciées par le satellite. Ce processus a abouti à dix classes ayant pour objectif de couvrir l'ensemble du territoire de la CCVCMB : les **zones urbanisées**, les plans d'**eau**, les **prairies montagnardes**, la **forêt**, la **limite de la forêt** (arbres et arbustes haut comme l'aulne vert, des saules, et des arbres épars), les **prairies productives ou alpages**, les **landes à Ericaceae**, les **prairies alpines** à plus faible productivité, les zones de **rocher ou de sol nu** et enfin les **zones de neige ou de glace** en

haute montagne. Voici une description plus détaillée de certaines classes d'habitat clefs, notamment concernant la végétation :

- **Prairie subalpine** : des prairies entourées par la lande et/ou la forêt, qui sont entretenues par le pâturage domestique passé, présent ou les deux (par exemple en-dessous du refuge de Loriaz, vers les chalets de Chailloux, au pied de la combe de la Pendant) mais déjà en altitude (au dessus de 1800 m) et pas en fond de vallée
- **Prairie montagnarde** : des prairies entretenues par l'activité humaine en fond de vallée par exemple les champs ou les prairies de fauche au Tour ou à Servoz
- **Limite de la forêt** : des zones de transition avec des arbres ou arbustes hauts (aulne, saule) à faible densité. Il s'agit de la limite sup. des arbres et des ligneux hauts, et qui peut être en interface avec le sol nu, de la lande ou la prairie
- **Lande** : des zones de lande assez denses caractérisées par la présence d'arbustes de la famille des Ericaceae et localement le genévrier nain
- **Écotone lande/prairie** = des zones en mosaïque lande et prairie, où le modèle prédit une forte probabilité à la fois de présence des landes et de la prairie
- **Prairie alpine** : une prairie d'altitude dont la présence s'explique surtout par des facteurs climatiques et non par les usages type pratiques pastorales (par exemple autour du refuge du Couvercle)

Une fois les classes établies, l'étape suivante a consisté à définir des points de calibration par photo-interprétation en utilisant le fond d'image aérienne infra-rouge couleur (IRC) prise en juillet 2020 disponible sur le [Géoportail de l'IGN](#). Le tableau 2 dans la partie Résultats liste le nombre de points d'entraînement établis pour chaque classe.

Calcul des variables explicatives

Le tableau 1 liste les variables explicatives retenues qui étaient dérivées du modèle numérique du terrain (MNT) et des images Sentinel 2A et 2B sur la période 2017 à 2021. Seules les variables avec un coefficient de corrélation inférieure à 0,7 avec les autres variables considérées ont été retenues pour l'étape suivante de modélisation. **Pour les variables dérivées de Sentinel-2, nous avons calculé chaque variable au niveau annuel et ensuite calculé une moyenne sur la période 2017-2021** afin de quantifier les valeurs "typiques" de la période d'étude et de lisser la variabilité inter-annuelle. L'annexe S1 fournit des précisions méthodologiques sur le calcul des cartes annuelles de degrés jours sans neige (SF-GDD), qui a nécessité de croiser les cartes de durée d'enneigement distribuées par [le Pôle THEIA](#)¹¹ pour les Alpes françaises avec les données de température issues des [réanalyses météorologiques Safran](#) fournies par Météo-France¹². Les indices spectraux (NARI¹, BI¹³, NDMI¹⁴) ont été calculés sur la plateforme [Google Earth Engine](#), à partir des formules qui sont présentées dans le tableau 1. Pour estimer les paramètres phénologiques (SOSD et EOSV¹⁵), nous avons téléchargé les produits dérivés des images Sentinel-2 fournis par les [services Copernicus](#). Enfin, les paramètres topographiques (TPI, DAH) ont été estimés à partir du [MNT à 25 m disponible pour l'Europe](#). Le TPI (Topographic Position Index) quantifie la convexité et la concavité du terrain, ce qui est connu pour avoir des effets importants sur la végétation alpine. Le DAH (Diurnal Anisotropic Heating index¹⁶) quantifie l'exposition des versants à l'ensoleillement, par exemple, entre un versant nord et sud. L'ensemble de ces variables explicatives ont été compilé sous forme d'un 'raster stack'

couvrant le territoire de la CCVCMB à 10 m de résolution spatiale.

Variable	Nom complet	Source	Méthode	Portail des données
SF-GDD	<i>Snow-free growing degree days</i> Somme des degrés jours sans neige	Produit neige CESBIO ; données de T° du modèle Safran de Météo-France	Annexe S1	https://theia.cnes.fr/
NARI	<i>Normalized Anthocyanin Reflectance Index</i> Indice normalisé d'anthocyanines	Images Sentinel 2A-B	$\frac{((1/B3) - (1/B5))}{((1/B3) + (1/B5))}$ <i>image automnale</i>	Google Earth Engine
BI	<i>Brightness Index</i> Indice de luminosité	Images Sentinel 2A-B	$\sqrt{\frac{(B4*B4) + (B3*B3)}{2}}$ <i>image automnale</i>	Google Earth Engine
NDMI	<i>Normalized Difference Moisture Index</i> Indice normalisé d'humidité	Images Sentinel 2A-B	$\frac{(B8 - B11)}{(B8 + B11)}$ <i>image estivale</i>	Google Earth Engine
SOSD	<i>Start of Season Date</i> Date de début de saison	Copernicus vegetation parameters	foumi	https://land.copernicus.eu/
EOSV	<i>End of Season Value</i> Valeur de prod. de fin de saison	Copernicus vegetation parameters	foumi	https://land.copernicus.eu/
TPI	<i>Topographic Position Index</i> Indice de position topographique	Copernicus EU-DEM	calculé dans R avec le package 'raster'	https://land.copernicus.eu/
DAH	<i>Diurnal Anisotropic Heating index</i>	Copernicus EU-DEM	calculé dans SAGA GIS	https://land.copernicus.eu/

Tableau 1. La liste des variables explicatives sélectionnées pour prédire les différentes classes d'habitat, en citant la source de chaque variable et en précisant si elle était calculée par nous-même ou par les fournisseurs des données. Quand nous avons calculé l'indice à partir des [images Sentinel-2](#), la formule est indiquée dans la colonne Méthode (par exemple, B3 correspond au canal vert de l'image, B4 au canal rouge etc.). Pour toutes les variables à l'exception du TPI et du DAH, nous avons calculé l'indice pour les années 2017 à 2021 et ensuite calculé la valeur moyenne pour chaque pixel. Les variables topographiques (TPI et DAH) en occurrence sont restées fixes pendant la période de prédiction. Des précisions sur le calcul de la variable somme des degrés jours sans neige (SF-GDD) sont fournies dans l'annexe S1.

Calibration du modèle prédictif

Nous avons calibré un algorithme de type *random forest* à partir d'un tableau qui regroupe les points d'entraînement avec les différentes variables explicatives citées dans le tableau 1. Pour cela, nous avons utilisé la fonction 'train' dans le package 'caret' dans le logiciel R version 4.2.1. Nous avons partitionné les données dans un jeu de données d'entraînement ($\frac{2}{3}$) et d'évaluation ($\frac{1}{3}$) en calibrant un modèle random forest à chaque fois. Nous avons répété cette procédure 1000 fois afin d'évaluer la qualité de la classification. Pour le modèle final, nous avons calibré un random forest sur l'ensemble des points d'entraînement ($N = 883$). Enfin, nous avons appliqué le modèle à l'ensemble de la zone d'étude à partir du stack de variables explicatives avec la fonction 'predict.train' afin de générer la carte prédite des habitats.

La classe écotone lande-prairie a été assignée dans un second temps, après la calibration du modèle random forest. Sur le terrain [il arrive souvent d'observer de la lande entremêlée avec les prairies sous forme de mosaïque](#), ce qui rend délicat la distinction nette entre ces deux habitats dans certains cas, notamment à une résolution de 10 m qui correspond à la taille des pixels de Sentinel-2. Cette confusion s'est manifestée dans le modèle, qui parfois prédisait simultanément une forte probabilité de lande et de prairie pour un même pixel (Figure A2). Afin de tenir compte de cette complexité, nous avons ajouté une classe intitulée écotone lande-prairie, qui a été attribuée quand le modèle prédisait une probabilité supérieure à 0,3 à la fois pour la classe lande et pour la classe prairie.

Campagne de terrain été 2022

Entre mi-juillet et fin août 2022, l'équipe du CREA Mont-Blanc, renforcée par des collaborateurs scientifiques et surtout par une équipe de bénévoles mobilisée pour la saison estivale, a réalisé **20 jours de terrain** pour effectuer des mesures de végétation et d'habitat (Figure 3). Le protocole, qui a été conçu pour être compatible avec celui du programme [Alpages Sentinelles](#) mené dans le cadre de la Zone Atelier Alpes, a consisté à poser deux mètres de 20 m de longueur au sol sous forme de croix, et ensuite d'effectuer les mesures suivantes tous les 50 cm : la hauteur de la canopée végétale, le type de sol (litière, végétalisé, sol nu, graviers cailloux entre 5 mm et 25 mm, cailloux entre 25 mm et 25 cm, blocs > 25 cm, lichen, mousse), ainsi que les espèces de lande qui touchaient le mètre tenu à la verticale, les graminoides herbacées, les forbes herbacées et les arbres et arbustes s'ils étaient inférieurs à 1m50. Afin de faciliter les relevés pour les personnes sans formation botanique, nous sommes restés au niveau du groupe fonctionnel pour les forbes et les graminoides sans identifier l'espèce. Visuellement nous avons également estimé la couverture de différentes strates de végétation sur l'ensemble de la placette (inférieure à 10 cm, entre 10 et 40 cm, entre 40 cm et 1m30, entre 1m30 et 4 m, supérieur à 4 m, et la proportion de sol nu / rocher).

Afin de structurer notre échantillonnage sur le terrain et pour limiter l'autocorrélation spatiale entre les points de mesure, nous avons généré une maille de 250 x 250 m qui couvrait l'ensemble des milieux supra-forestiers de la CCVCMB. Nous avons ensuite réalisé nos relevés d'habitat à l'intérieur d'un maximum de ces mailles, ainsi que devant chaque piège photo (Figure A3). Au total nous avons réalisé **142 points de mesure de la végétation**, avec un total de **11 000 mesures de hauteur et du sol** et la **reconnaissance de 22 785 plantes**.

Validation terrain de la carte d'habitat

Afin d'évaluer la pertinence écologique de la carte d'habitat générée, nous avons réalisé plusieurs analyses qui croisent la classification finale avec les relevés d'habitat effectués sur le terrain (Figure 3). La première a consisté à extraire la classe d'habitat pour chaque point de relevé, et ensuite de quantifier l'abondance des groupes fonctionnels (lande, graminoides, forbe) pour chaque classe cartographique concernée : lande, écotone lande-prairie et prairie alpine. La deuxième analyse a consisté à calculer la hauteur de canopée moyenne pour chaque relevé, et ensuite de quantifier si les différentes classes d'habitat de la carte correspondaient à des variations systématiques dans la hauteur végétative. Enfin, nous avons extrait les variables explicatives (Tableau 1) pour chaque point de relevé afin de tester la possibilité d'affiner la classification, notamment en distinguant les landes à *Rhododendron* des landes basses à *Vaccinium*. Nous avons réalisé une analyse multi-variée du type ACP afin de voir si certaines variables explicatives utilisées pour générer la carte d'habitat pourrait aussi servir pour i) affiner la classification et ii) prédire certaines propriétés fonctionnelles des habitats relevés sur le terrain comme la hauteur des canopées.



Figure 3. Photo du protocole de terrain en cours sur le haut de la montagne de Peclerey à 2450 m, surplombant le glacier d'Argentière. On distingue les deux mètres de 20 m posés au sol sous forme de croix, ainsi que le travail d'équipe qui a consisté en deux binômes sur chaque transect : une personne qui mesurait et une personne qui notait. La figure A3 montre la localisation des 142 relevés d'habitat effectués dans la vallée de Chamonix.

Indicateurs de diversité floristique et faunistique en lien avec la couverture des landes

Dans le cadre du deuxième Work Package du projet, nous nous sommes intéressés aux conséquences d'une couverture plus importante de lande sur la diversité floristique et aussi sur l'utilisation des habitats par certaines espèces de faune ciblées (lièvre variable et chamois). Afin de tester notre hypothèse qu'une couverture plus forte des Ericaceae conduirait à une baisse de la diversité floristique localement, nous avons obtenu les relevés phytosociologiques réalisés par le Conservatoire Botanique National Alpin (CBNA) sur le territoire de la Haute-Savoie entre 2011 et 2021. Nous avons ensuite extrait les relevés situés au-dessus de 1700 m d'altitude et caractérisés par la présence d'une espèce de lande à Ericaceae et/ou le genévrier nain (*Juniperus communis nana*), ce qui a mené à une sélection de 144 relevés sur le département. Pour chaque relevé, nous avons calculé la richesse spécifique floristique totale ainsi que le pourcentage de recouvrement de lande arbustive, de *Rhododendron ferrugineum* et de *Vaccinium uliginosum*.

Nous nous sommes également posé la question du lien entre la couverture de lande et l'utilisation des habitats par la faune, en particulier le chamois (*Rupicapra rupicapra*) et le lièvre variable (*Lepus timidus*). Dans un premier temps, il a fallu estimer la probabilité que ces espèces occupent différents habitats au long de l'année. Cet indice a été calculé à partir des contacts enregistrés par les pièges photo. Pour le chamois, nous avons également modélisé la probabilité d'occupation selon la hauteur de la canopée végétale, pour vérifier si l'espèce a tendance à éviter des habitats avec une hauteur de canopée trop élevée. Pour le lièvre, nous avons extrapolé les résultats observés par piège photo concernant la fréquentation des différents habitats selon la saison en utilisant la carte d'habitat à 10 m.

III. Résultats techniques

La cartographie des habitats

La matrice de confusion résultant du random forest indique un taux d'erreur moyen de 15%, avec néanmoins de fortes variations entre les différentes classes. Les prairies montagnardes et les prairies subalpines d'alpage montrent les taux d'erreur les plus élevés (25 et 34 %, respectivement). Ces deux habitats sont dépendants des activités humaines et très fragmentés au sein du paysage, et donc sont particulièrement difficiles à modéliser. Le taux d'erreur pour la classe eau était également élevé (27 %), ce qui était dû en partie à une confusion avec les zones d'ombre en haute montagne sous les parois exposées au nord et les surfaces en eau, vu que ces deux objets ont tendance à absorber la majorité des ondes dans le visible et l'infrarouge. Pour la classe lande, le taux d'erreur était de 14 %. Le tableau A1 indique l'importance, c'est-à-dire le pouvoir prédictif, de chaque variable intégrée dans le modèle final : la variable la plus importante a été le SF-GDD, qui quantifie l'énergie disponible pour les plantes le long du gradient d'altitude. La variable de luminosité des sols (BI) calculée pendant la saison automnale a également été très performante pour différencier différents types de végétation et d'occupation du sol. Les variables topographiques (TPI et DAH) ont finalement eu peu de pouvoir prédictif.

	<i>N</i>	Forêt	Neige et glace	Lande	Prairie montagnarde	Prairie alpine	Rocher et sol nu	Prairie subalpine	Limite de la forêt	Eau	Urbain	Taux d'erreur (%)
Forêt	119	112	0	0	3	0	0	0	4	0	0	0,06
Neige et glace	27	0	26	0	0	0	1	0	0	0	0	0,04
Lande	209	0	0	180	0	16	0	2	11	0	0	0,14
Prairie montagnarde	36	7	0	0	27	0	0	0	1	0	1	0,25
Prairie alpine	116	0	0	24	0	89	2	1	0	0	0	0,23
Rocher et sol nu	111	2	0	0	0	1	105	0	0	0	3	0,05
Prairie subalpine	56	0	0	13	0	4	0	37	2	0	0	0,34
Limite de la forêt	105	8	0	10	0	0	0	0	87	0	0	0,17
Eau	15	0	0	0	1	0	2	0	0	11	1	0,27
Urbain	53	0	0	0	0	0	5	0	0	0	48	0,09
	$\Sigma = 883$											$\bar{x} = 15\%$

Tableau 2. Le nombre de points d'entraînement ($N = 883$) ainsi que la matrice de confusion résultant du modèle de type *Random forest* pour chaque classe d'habitat. Le taux d'erreur est également donné par classe et au niveau global (erreur moyenne de 15%). Les taux d'erreur pour les classes lande, prairies alpines et subalpines sont plus bas pour la carte finale suite au rajout de la classe écotone lande-prairie (qui correspond aux pixels où le modèle prédit à la fois une forte probabilité de lande et de prairie).

Les relations entre les différentes variables explicatives et les classes d'habitat sont présentées dans la figure 4. **Comme pour l'ensemble des classes, chez les landes la variable la plus importante était la SF-GDD qui capture le gradient topo-climatique** des variations d'enneigement et de température, suivi par le **SOSD, le NARI et le BI**. Bien que ce phénomène reste un champ de recherche¹⁷, il semble cohérent que les arbustes démarrent leur saison de croissance plus tôt au printemps par rapport aux prairies adjacentes qui ont tendance à rester plus longtemps sous la neige (SOSD). Le NARI, qui est sensible à l'accumulation des pigments de type anthocyanine dans les feuilles des Ericaceae¹, s'est avéré efficace pour aider à distinguer les landes des prairies. Enfin le pouvoir explicatif du BI est aussi logique en considérant que les prairies ont tendance à être plus

claires alors que les landes sont caractérisées par des canopées plus sombres, notamment à l'automne.

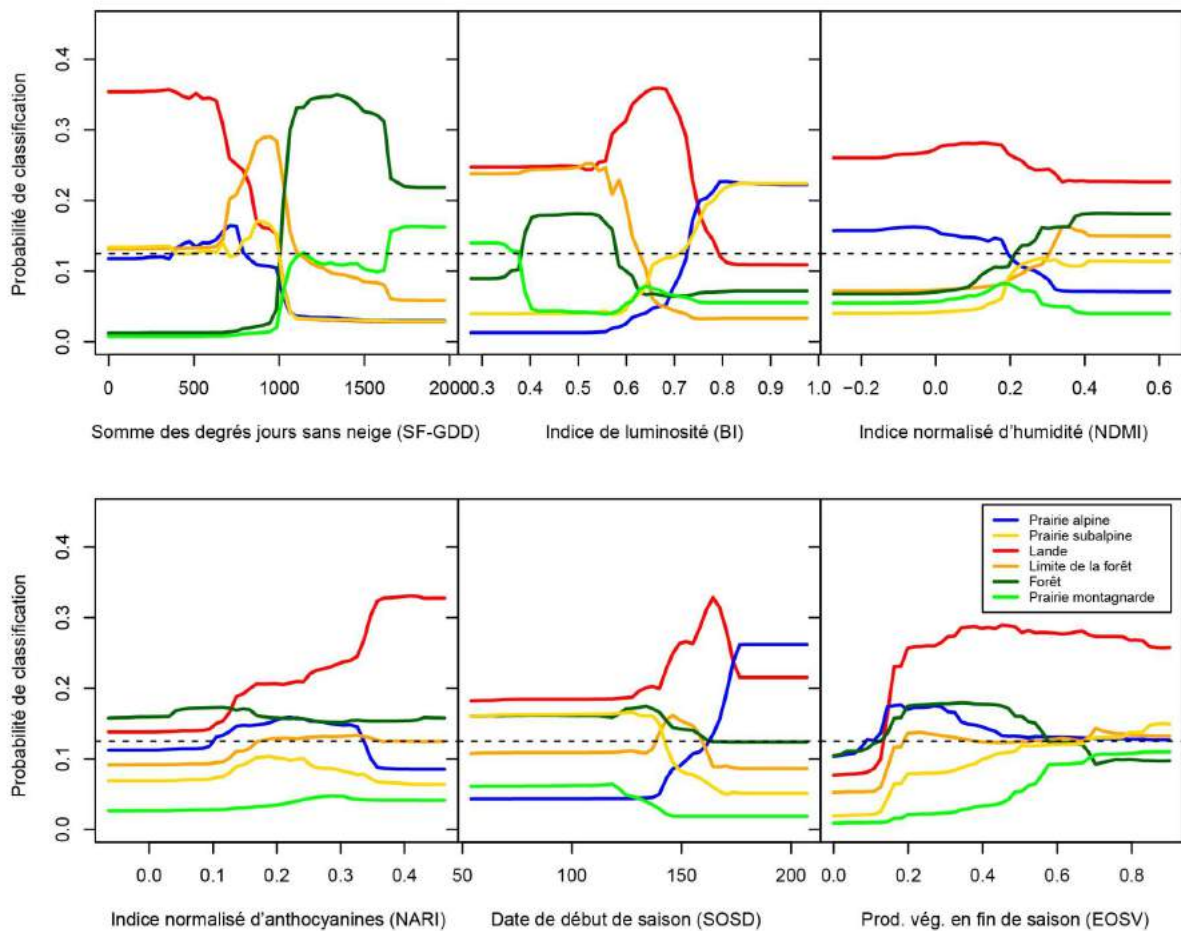


Figure 4. Courbes de réponse (*partial dependency plots*) des probabilités de classification de chaque habitat en fonction des variables explicatives. Plus la courbe atteint une valeur élevée de probabilité pour une classe donnée, plus la variable exerce une capacité de prédiction importante. Par exemple, la probabilité de classification de la classe lande augmente fortement quand les valeurs du NARI dépassent un seuil de 0,3.

Le résultat mène à une carte des habitats de la CCVCMB à 10 m de résolution (Figure 5A). Grâce à la figure 5B, on s'aperçoit que la carte ORION fournit une information plus riche au niveau des habitats alpins que les cartes disponibles au niveau français (OSO) et européenne (CORINE). Au niveau général, dans la CCVCMB les landes constituent un habitat dominant dans les milieux supra-forestiers de l'ensemble de la vallée, entrecoupées par quelques zones d'alpage comme ceux du Chailloux, de la Pendant, du col de Balme et de la Loriaz. A plus haute altitude on retrouve des zones de prairie alpine, par exemple au Couvercle, sur le haut du balcon sud des Aiguilles Rouges, et sur le haut du vallon de Bérard. De manière générale, les prairies (d'alpage et alpines) couvrent environ 5% du territoire de la CCVCMB, et représentent un milieu en fin de compte assez rare et fragmenté, à surveiller du point de vue de la conservation et de la gestion (Figure 6).

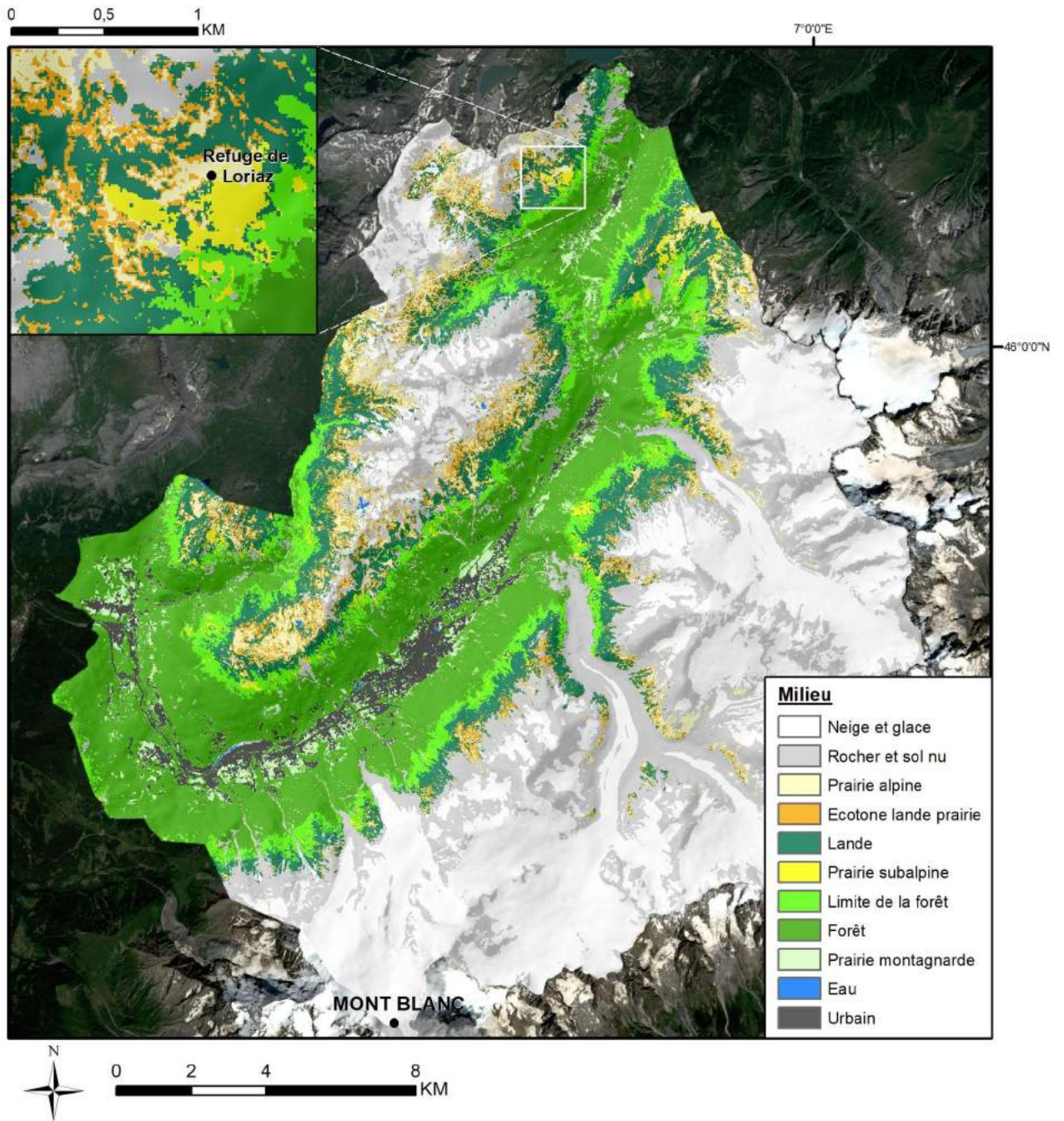


Figure 5A. Carte d'habitat finale à 10 m de résolution spatiale sur le territoire de la CCVCMB pour les 11 classes modélisées. La carte zoomée en haut à gauche montre la variation spatiale des milieux dans le secteur de la montagne de Loriaz dans la commune de Vallorcine. **Cette carte pourrait être mise à jour dans les années à venir et au fil de la mission des satellites Sentinel-2 afin de suivre l'évolution du territoire dans un contexte de changement climatique et d'activités humaines (pastoralisme, tourisme, agriculture...).**

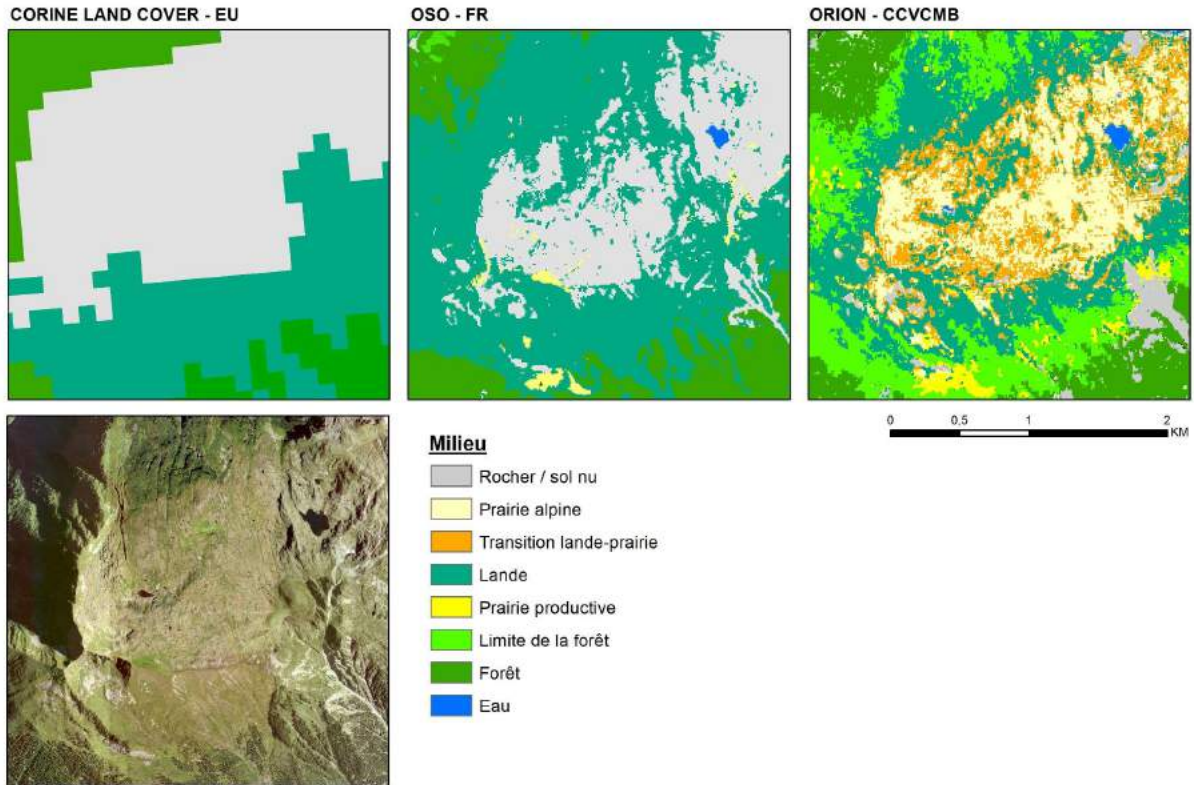
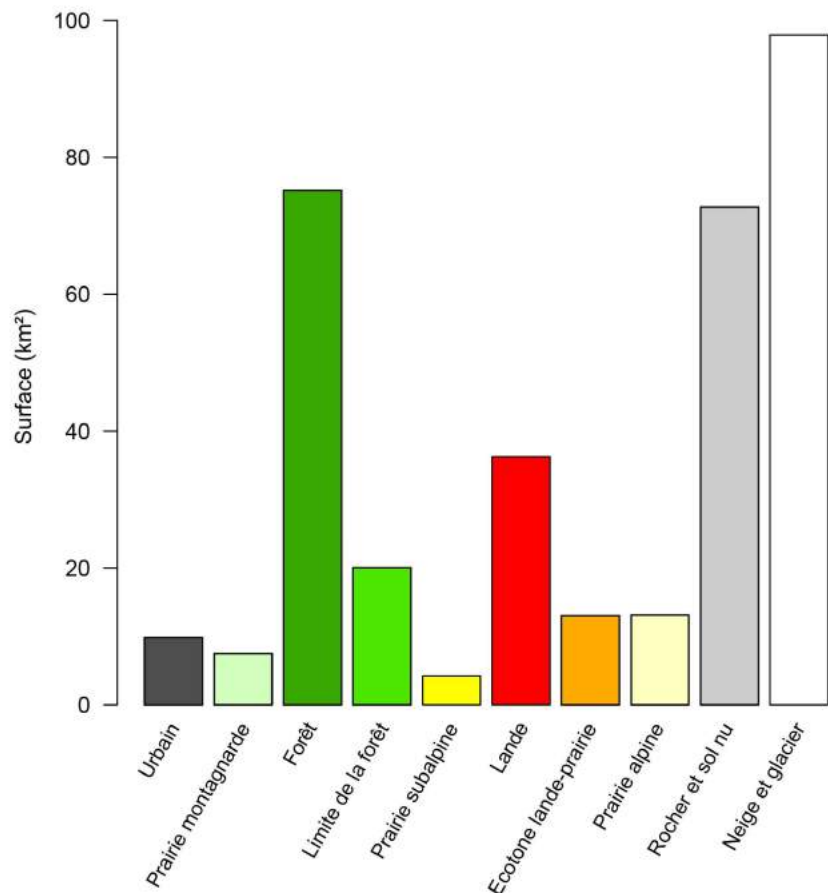


Figure 5B. Comparaison de la carte ORION avec les cartographies existantes à l'échelle européenne (CORINE, résolution 100 m) et nationale (OSO, résolution 20 m) sur le secteur de Bellachat dans les Aiguilles Rouges. La carte ORION fournit plus d'information et de précision par rapport aux produits existants, notamment dans le contexte des milieux alpins (landes et prairies). **Pour la suite de ce rapport, la classe lande indiquée ici en vert canard sera indiquée en rouge afin de mettre en avant la problématique de la fermeture de milieux ouverts par les landes.**

Figure 6. Répartition des surfaces pour chaque classe d'habitat sur le territoire de la CCVCMB, estimée pour la période 2017-2021. Ensemble, **les prairies subalpines et alpines, pourtant riches en biodiversité et services écosystémiques, couvrent 5% du territoire de la CCVCMB.**



Validation de la carte d'habitat

Au niveau du premier objectif de la campagne de terrain, **nous avons trouvé une forte cohérence entre les mesures effectuées sur le terrain et la carte d'habitat générée à partir des images satellitaires** (Figure 7). Il est important de préciser que les relevés de terrain ont été réalisés indépendamment de la carte d'habitat, c'est-à-dire que l'emplacement des relevés a été choisi à l'intérieur de chaque maille sans consultation préalable de la carte d'habitat. Après avoir extrait le type d'habitat pour chaque relevé de végétation à posteriori, nous avons quantifié la fréquence des différents groupes fonctionnels de végétation en fonction de la classe d'habitat (Figure 7). Le résultat montre une forte fréquence des landes dans les pixels classés ainsi, tandis que la classe lande-prairie montre une imbrication des trois types de végétation. Les pixels classés en tant que prairie alpine montrent un pic des landes près de 0, avec une plus haute fréquence des forbes et des graminoides. Ce résultat suggère que **passer d'un habitat à l'autre selon le satellite, par exemple de la lande à la prairie alpine, implique des changements fonctionnels** comme une baisse dans la quantité de forbes qui constituent une ressource à haute qualité fourragère pour la faune sauvage et domestique (par exemple le trèfle alpin ou la gentiane pourpre).

Nous avons également extrait les mesures de hauteur végétale pour l'ensemble des relevés de terrain réalisés au-dessus de la forêt (Figure 8). Là encore, on observe une cohérence entre la carte d'habitat et la structure de la végétation mesurée sur le terrain, avec une diminution de la hauteur en passant des classes d'arbuste haut et de lande vers les classes de prairie. La figure 8 suggère donc aussi un changement structurel au niveau de la hauteur de canopée en passant d'une classe d'habitat à une autre, ce qui peut avoir des conséquences pour la faune sauvage, domestique comme pour les humains hors sentier. A noter que la classe "lande" montre une forte variabilité des valeurs de hauteur, avec des mesures entre 5 et 50 cm. Ce résultat suggère qu'**il serait intéressant de tenter de scinder la classe lande actuelle en deux, avec une classe "lande haute" typiquement à rhododendron et une classe "landine"** ou lande basse caractérisée par d'autres Ericaceae comme les *Vaccinium* sp., l'azalée naine, la callune ou encore la camarine noire.

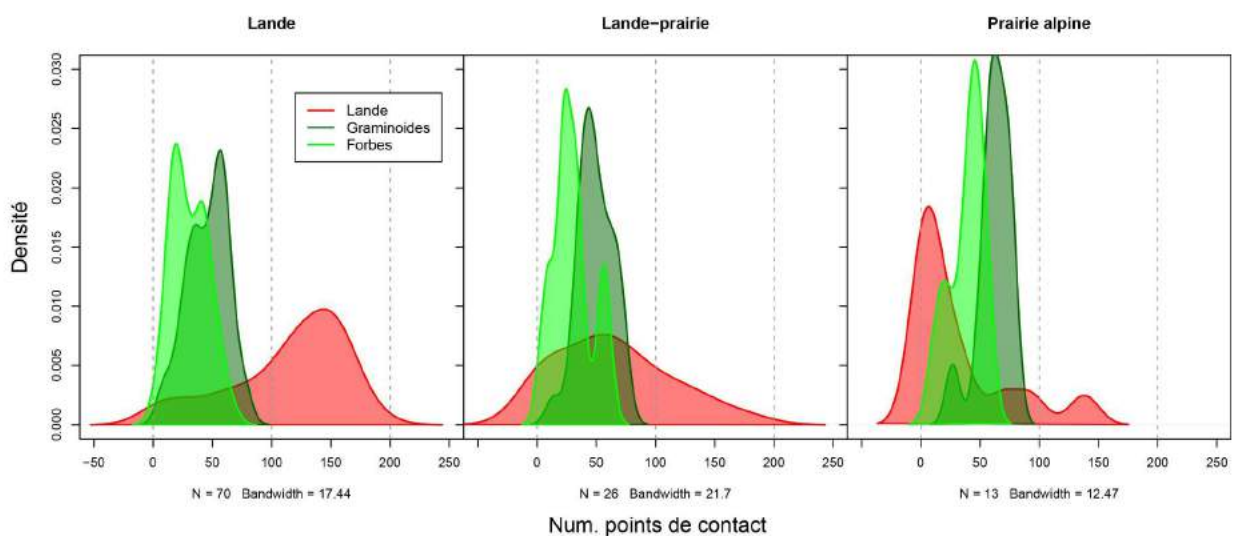


Figure 7. Densité (ou fréquence) du nombre de points de contact des groupes fonctionnels de végétation en fonction de la classe d'habitat attribuée par le modèle. Plus la valeur de l'axe X est élevée, plus le groupe fonctionnel est fréquent au sein de l'habitat. Selon les relevés de terrain, les landes à Ericaceae sont plus

fréquentes dans la classe lande, tandis que les forbes et les graminoides sont plus abondants au sein de la classe prairie alpine de la carte ORION.

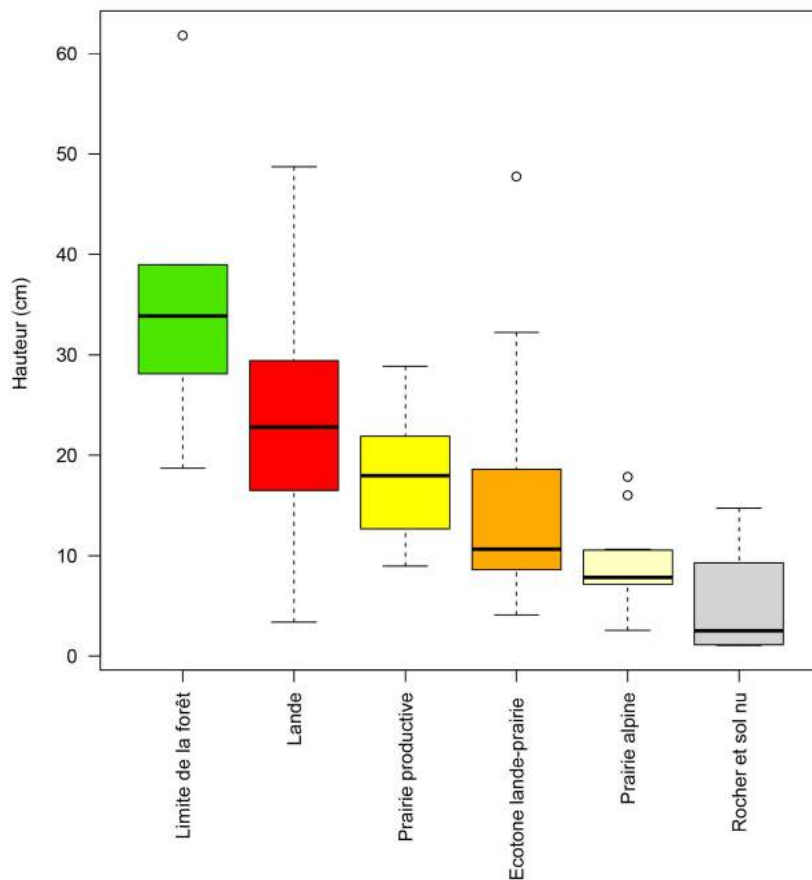


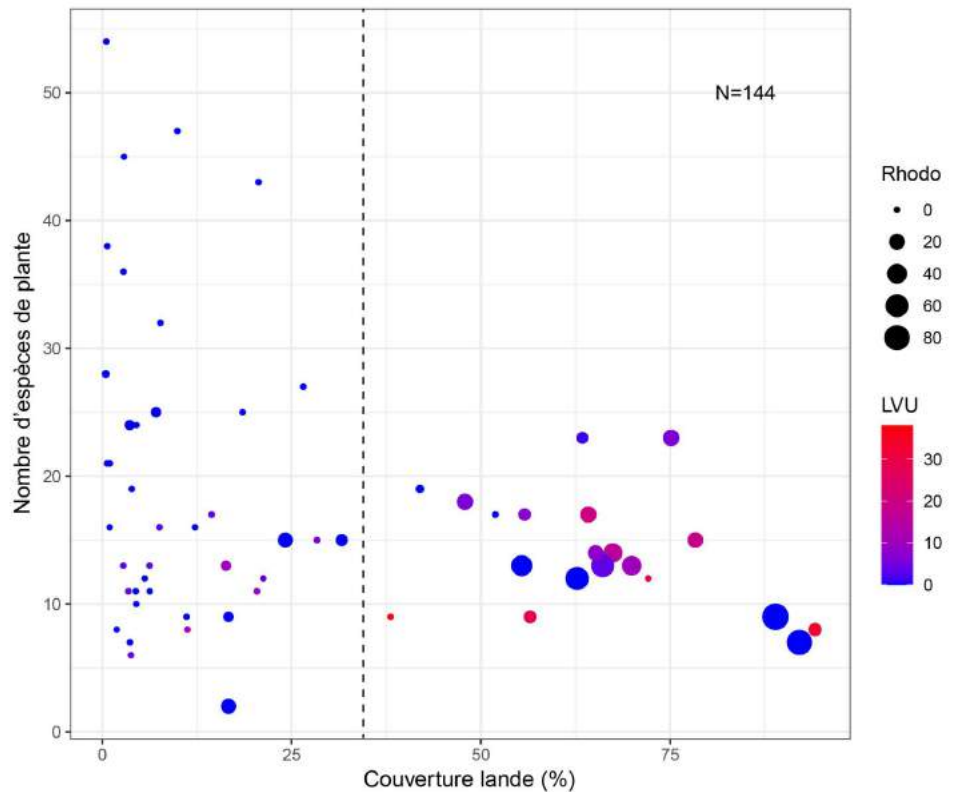
Figure 8. Boxplots de la hauteur de la canopée végétale mesurée sur le terrain (valeur moyenne par placette), en fonction de la classe d'habitat. Ce résultat indique que les classes d'habitat correspondent à des variations structurelles des habitats sur le terrain, ici la hauteur des canopées.

Implications de l'expansion des landes pour la flore et la faune

Indicateur de diversité floristique

La figure 9 montre qu'à **partir d'une couverture de lande supérieure à 30%, la richesse spécifique des plantes vasculaires a tendance à diminuer**. Cette baisse de diversité est liée la plupart du temps à une couverture plus forte soit du rhododendron ferrugineux (*Rhododendron ferrugineum*), soit de l'airelle bleu (*Vaccinium uliginosum*), soit des deux. Une autre perspective pour approfondir cette analyse par la suite consisterait à calculer d'autres indices de diversité type Shannon, Simpson, etc. afin de mieux comprendre les conséquences de l'expansion des landes sur la structure des communautés végétales. Il est important à noter également que la quantité d'espèces est seulement un indicateur, et que la qualité fourragère est un autre facteur important à quantifier afin d'évaluer les conséquences de l'expansion des landes sur la ressource disponible aux herbivores, typiquement les ongulés sauvages et domestiques.

Figure 9. Variation de la richesse spécifique des plantes en fonction de la couverture des landes pour 144 relevés phytosociologiques réalisés par le CBNA au-dessus de 1700 m en Haute-Savoie. La taille des points correspond au pourcentage de recouvrement du rhododendron (Rhodo), tandis que la couleur correspond au pourcentage de l'airelle bleu (LVU). **On observe une baisse dans la diversité floristique à partir de plus de 30% de recouvrement de lande.**



Indicateurs d'habitat favorable du chamois et du lièvre variable

Grâce à l'analyse des images issues des pièges photo, nous avons pu constater que le lièvre variable a tendance à passer l'hiver dans la forêt pour s'abriter et trouver de la nourriture. Cependant à la fin du printemps et au début de la période estivale, l'espèce est détectée le plus souvent dans des zones de transition entre la lande et la prairie (Figure 10). En occurrence l'espèce n'est jamais très présente ni dans les prairies pures, qui peuvent offrir une ressource alimentaire de qualité mais qui rendent le lièvre exposé aux prédateurs, ni dans les landes denses, qui probablement compliquent le déplacement de l'animal et offre une ressource alimentaire limitée. Nous faisons l'hypothèse qu'une mosaïque de landes et de prairie fournit à la fois une protection contre les prédateurs, grâce à la canopée plus haute des landes, et également de la nourriture grâce à la ressource plus importante présente dans les milieux herbacés. Ce résultat suggérerait donc que **le maintien d'une diversité de milieux ouverts et semi-ouverts semble important pour conserver l'habitat de cette espèce**, comme cela a déjà été montré pour d'autres espèces de faune sauvage comme le tétras-lyre¹⁸. Ce type d'analyse reste à répliquer pour d'autres espèces présentes sur le territoire de la CCVCMB comme le lagopède alpin.

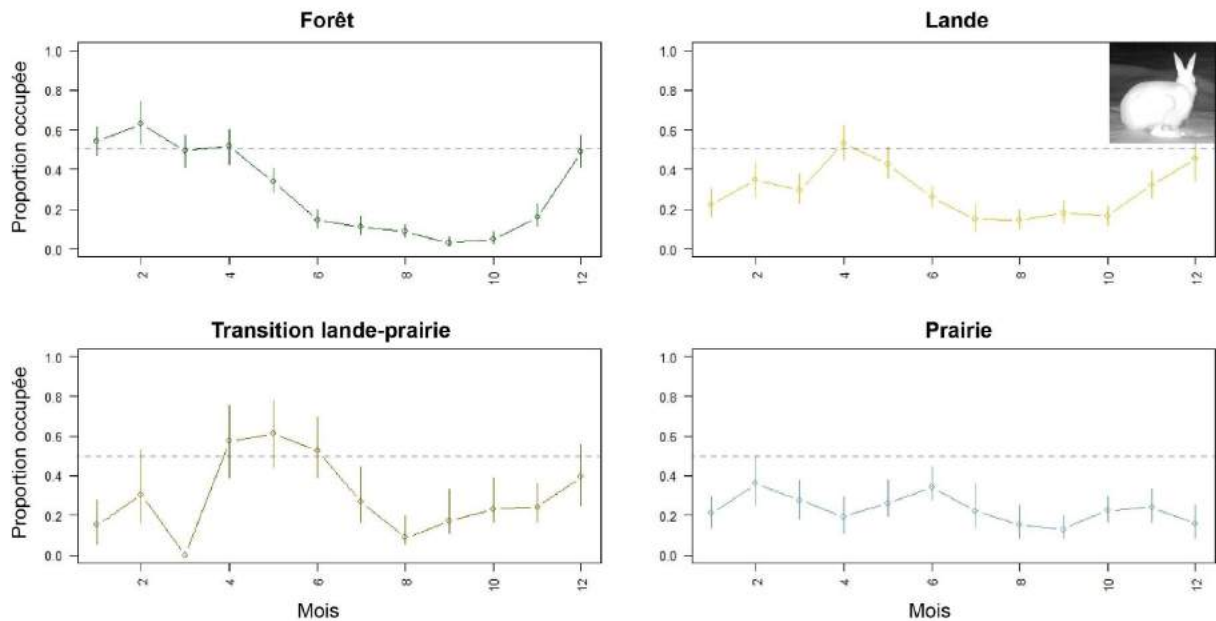


Figure 10. Proportion des sites de piège photo occupés par le lièvre variable en fonction du mois de l’année et du milieu, estimé à partir d’un modèle de “site occupancy”. L’espèce semble préférer passer l’hiver dans la forêt et l’été de préférence dans les zones de transition entre la lande et la prairie.

Nous avons également analysé les relevés d’habitat afin de mieux comprendre les interactions entre la structure de la végétation et la fréquentation de la faune sauvage, notamment le chamois. A partir des pièges photo, nous avons trouvé que le chamois montre une baisse de probabilité d’occupation dans des sites caractérisés par une hauteur plus importante de végétation, en particulier au-delà de 40 cm (Figure 11). Sachant que le rhododendron forme les canopées de lande les plus hautes dans la vallée de Chamonix, **ce résultat suggère que le chamois a tendance à éviter les zones denses de rhododendron qui risquent de freiner son déplacement et qui sont probablement pauvres en termes de ressources fourragères.**

L’analyse ACP (Figure A4) montre des corrélations assez fortes entre certaines variables explicatives (SF-GDD et BI) et la hauteur des canopées. Nous avons utilisé cette relation statistique pour générer une carte continue des valeurs de hauteur des canopées (Figure 12) qui représente une première tentative de spatialisation des propriétés fonctionnelles des habitats. En occurrence, nous n’avons pas trouvé de lien statistique entre les variables explicatives que nous avons testées et différents types de landes (landine basse et lande à rhododendron notamment). Pour cela, nous sommes restés sur notre classification initiale qui n’identifie que les milieux de lande et d’écotone lande-prairie, sans préciser différents types de lande.

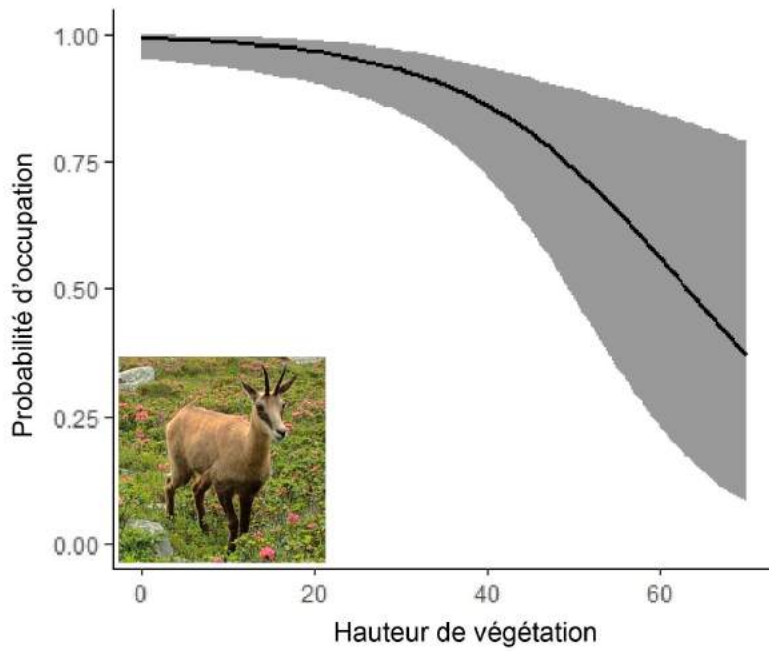


Figure 11. Courbe de probabilité d'occupation (autrement dit de détection par piège photo) du chamois en fonction de la hauteur de la canopée végétale. L'incertitude statistique de la courbe est montrée par la zone grisée qui montre l'erreur standardisée.

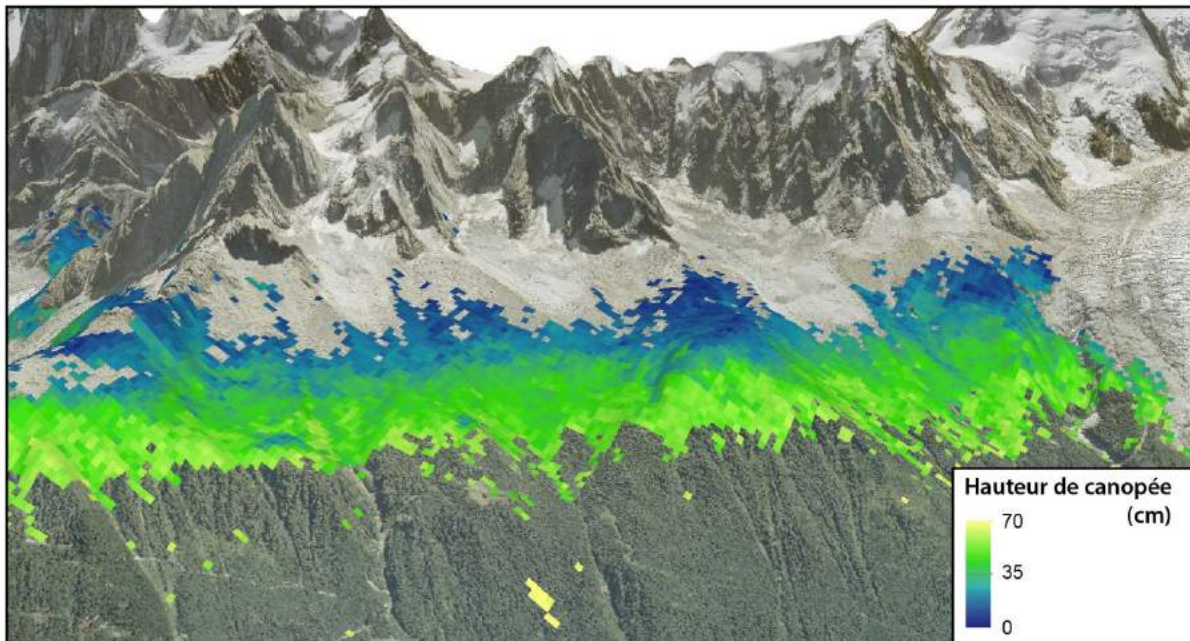


Figure 12. Carte prédite de la hauteur de la canopée végétale sur le secteur du Plan de l'Aiguille, produite à partir d'un modèle linéaire entre la hauteur moyenne mesurée pour chaque relevé et le SF-GDD et le BI. La figure A5 fournit plus de précisions statistiques sur le modèle utilisé pour générer cette carte. Cette analyse préliminaire soulève l'idée de modéliser la probabilité d'occupation de différentes espèces de grands herbivores à partir des variables spatiales et notamment les propriétés fonctionnelles des habitats (par exemple la hauteur de canopée, la qualité fourragère ou la distance à la forêt ou aux points chauds d'activités humaines).

IV. Perspectives pour la gestion et la conservation

Dans le but de rendre les résultats du projet ORION plus opérationnels pour les gestionnaires de la vallée de Chamonix (CCVCMB et Asters), nous avons zoomé sur quelques problématiques et zones à fort enjeux pour le territoire. **Les objectifs identifiés sont les suivants : conserver la diversité et la ressource pastorale dans les alpages et les prairies d'altitude, suivre l'évolution des habitats au sein des réserves naturelles, et favoriser un équilibre entre la faune sauvage et les activités humaines** (Figure 13). Nous partons du principe qu'un suivi plus précis de l'évolution des milieux naturels et semi-naturels pourrait faciliter et informer la prise de décision dans les années à venir en vue de ces objectifs.



Figure 13. Photo prise par piège photo des moutons surpris par des chamois dans le secteur de la montagne de Peclerey. Nous faisons l'hypothèse que la surface de prairie limitée de la CCVCMB, qui risque de diminuer encore davantage face à la remontée des arbres et l'expansion des landes, intensifie la compétition pour les ressources entre les ongulés sauvages et domestiques.

Identification des zones à fort enjeu dans la vallée de Chamonix

Les alpages

Nous avons extrait la carte d'habitat pour chaque alpage de la vallée de Chamonix, en les classant du plus au moins embroussaillés (Figure 14). On constate un fort gradient entre l'alpage de Blaitière qui est presque entièrement colonisé par les landes et la forêt, et l'alpage de Bellachat à côté du Brévent, qui reste majoritairement en prairie. Dans certains alpages comme Balme, le Lavancher et Loriaz, les zones de prairies subalpines en jaune sont entourées par la lande et la limite de la forêt, ce qui suggère que l'activité pastorale (passée et actuelle) maintient ces zones de prairies dans des lieux qui seraient autrement colonisés par les ligneux (arbres et arbustes). Il est intéressant de noter que si on regarde uniquement la photo aérienne de ces alpages (Figure A6), à l'œil nu il est

possible de distinguer seulement la végétation en forêt de la non-forêt, ce qui souligne l'utilité de la carte ORION pour pouvoir différencier les zones supra-forestières de prairie et de lande.

Pour aller plus loin dans l'analyse, nous avons distingué les classes d'habitat "pâturables" et "non-pâturables". Nous avons considéré qu'une activité pastorale est possible dans les milieux de prairie montagnarde, de prairie subalpine, d'écotone lande-prairie, et également dans les prairies alpines. En l'occurrence, on considère que la forêt et les zones de limite de forêt, les zones de landes continues ou les zones de rocher et de sol nu fournissent une ressource insuffisante pour soutenir une activité pastorale. Cette distinction est forcément simpliste, et ignore la présence de plantes herbacées présentes au sein de la lande (Figure 7) et aussi la possibilité de pâturage en sous-bois (mais il nous semble que cette forme de pâturage est très peu pratiquée dans la CCVCMB). Grâce à cette démarche, **nous pouvons quantifier un indicateur de "surface pâturable" pour chaque alpage (Figure 15), qui représente un pourcentage de surface propice au pâturage**. Cette surface est susceptible d'évoluer en fonction de la charge pastorale allouée au cours de l'année, le type de bétail, et aussi des éventuelles actions de débroussaillage entreprises par les bergers et/ou les gestionnaires. Ainsi, cet indicateur pourrait servir comme jauge de la conservation des alpages existants mais aussi de restauration des alpages qui sont actuellement en grande partie enfermés par les ligneux.

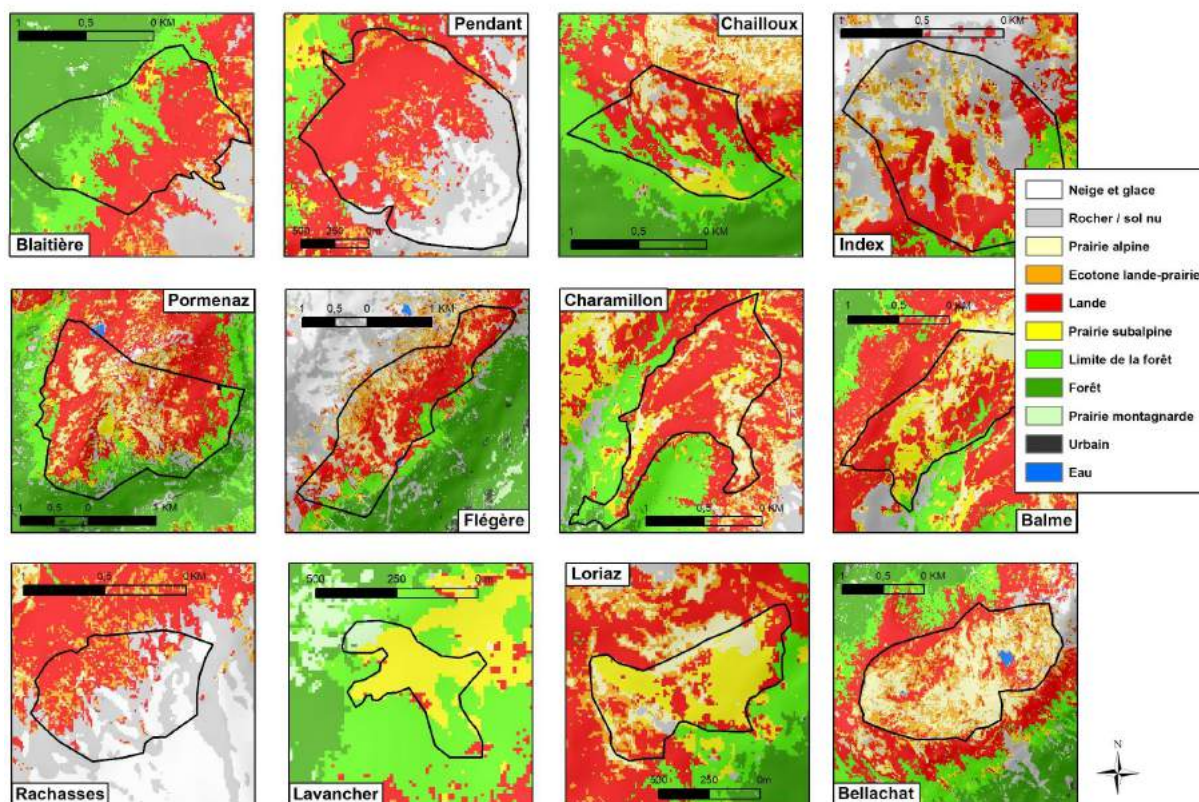


Figure 14. Extraits de la carte d'habitat pour chaque alpage de la CCVCMB. Les alpages de Blaitière, de la Pendant et des Rachasses ont très peu de prairies continues, même si des graminoides et forbes sont sûrement entremêlés dans la lande et fournissent une certaine ressource pastorale (Figure 7). En l'occurrence les alpages de Bellachat, Loriaz et le Lavancher présentent des étendues importantes de prairies. On peut déduire que ces prairies sont entretenues par l'activité pastorale historique et actuelle puisqu'elles se retrouvent entourées par la lande, la forêt ou les deux.

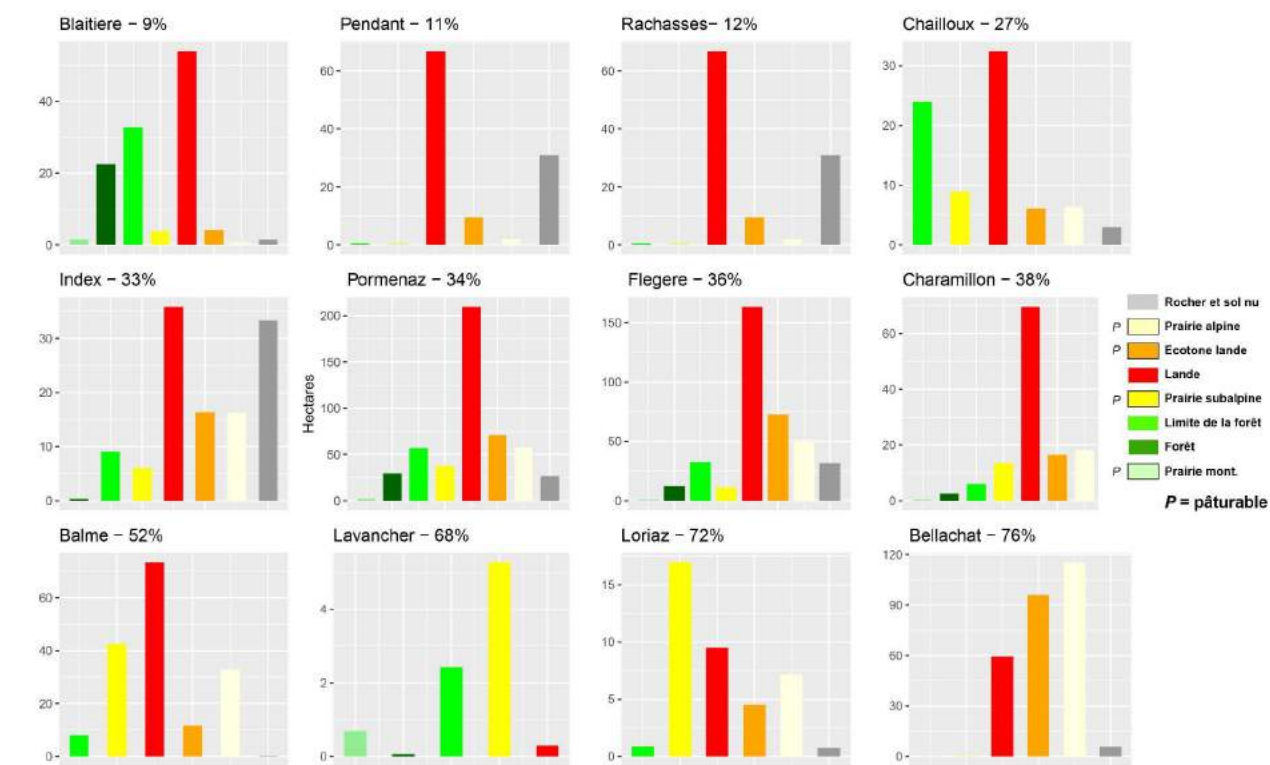


Figure 15. Distribution de la surface des différents habitats présents au sein des alpages de la CCVCMB. La “surface pâturable” est définie ici par la somme des habitats suivants : les prairies montagnardes, les prairies subalpines, les zones d’écotone lande-prairie et les prairies alpines. **La lande représente l’habitat dominant de tous les alpages de la CCVCMB à l’exception du Lavancher, Loriaz et Bellachat.** La surface pâturable pourrait devenir un indicateur à quantifier dans les années à venir afin de suivre et mieux comprendre l’évolution des alpages en lien avec l’activité (ou manque d’activité) pastorale et le changement climatique.

Les réserves naturelles

Les réserves naturelles de la vallée ont comme première vocation de protéger la biodiversité et sa libre évolution, avec un minimum d’interférence par les activités humaines. Dans ce contexte, **la carte ORION pourrait surtout servir à suivre et à quantifier les trajectoires des différents habitats que l’on protège, et à mieux comprendre leur vitesse d’évolution, face principalement au changement climatique.** Néanmoins, si l’objectif est de conserver certains milieux ouverts à forte diversité (pelouse de combe à neige, flore des zones humides alpines, ou des prairies alpines mésophiles riches en espèces, par exemple), ou encore l’habitat favorable pour la faune qui a besoin d’un habitat en mosaïque semi-ouverte pour son bon fonctionnement (comme le tétras-lyre), à ce moment la carte ORION pourrait servir pour valider l’efficacité des mesures de conservation mises en place. Nous pouvons aussi imaginer des **enjeux croisés entre le pastoralisme et la conservation, comme par exemple à l’alpage de Bellachat** qui se trouve dans le réserve de Carlaveyron (Figure 16), alpage le plus grand de la vallée de Chamonix et qui représente une zone importante pour la faune et la flore sauvage.

Aujourd’hui, les réserves naturelles de Chamonix abritent une forte diversité de milieux, avec très peu de prairie subalpine pâturée mais sinon une belle distribution des autres habitats naturels (Figures 16-17). Les landes constituent l’habitat dominant de la réserve des Aiguilles Rouges, alors que la forêt est dominante à Carlaveyron et le sol nu des milieux de haute montagne (éboulis, pierriers, paroi) représente la surface la plus importante dans le vallon de Bérard.

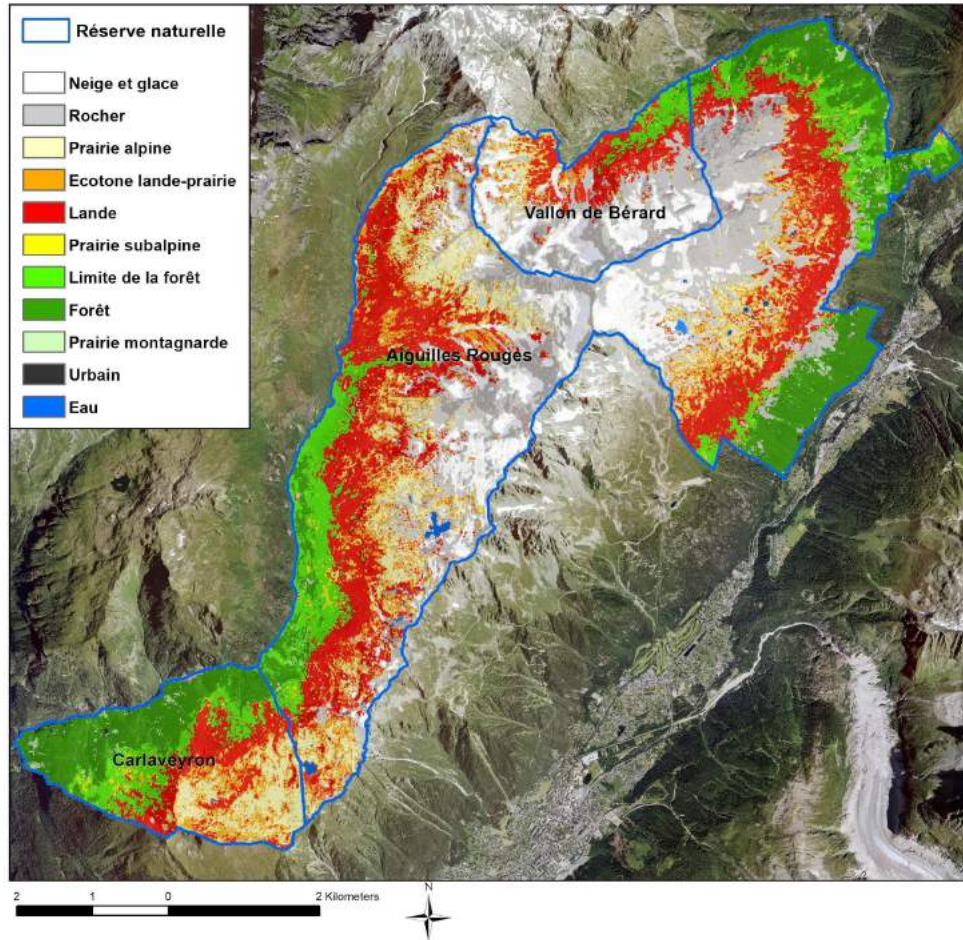


Figure 16. Extrait de la carte des habitats dans le périmètre des réserves naturelles de la CCVCMB.

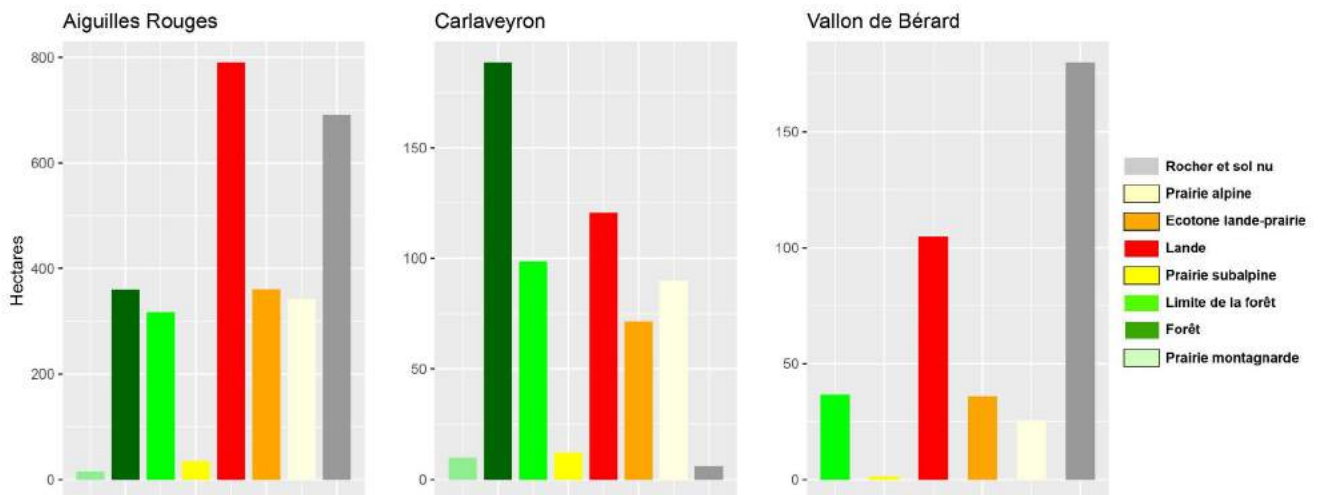


Figure 17. Distribution de la surface des différents habitats présents au sein des réserves naturelles de la CCVCMB. Comme pour les alpages, la mise à jour de la carte ORION pourrait servir à suivre l'évolution des habitats dans les années à venir et éventuellement à identifier des zones de régression de certains habitats critiques comme les prairies alpines.

Vers des cartes saisonnières d'habitat occupé par la faune sauvage

Le réseau de pièges photo installé par le CREA Mont-Blanc dans la vallée de Chamonix permet d'observer l'invisible : des espèces discrètes, actives la nuit et à l'aube et qui fuient la présence humaine. Ces informations précieuses permettent de mieux comprendre le comportement de la faune sauvage et leur utilisation des habitats au fil des saisons, comme le montre la figure 10 pour le lièvre variable. Une limite de cette approche est que les observations sont restreintes aux endroits où les caméras sont installées. Dans ce contexte, la carte ORION peut fournir un outil complémentaire qui permet de passer de l'échelle locale à l'échelle paysagère et à "spatialiser" les résultats observés par piège photo.

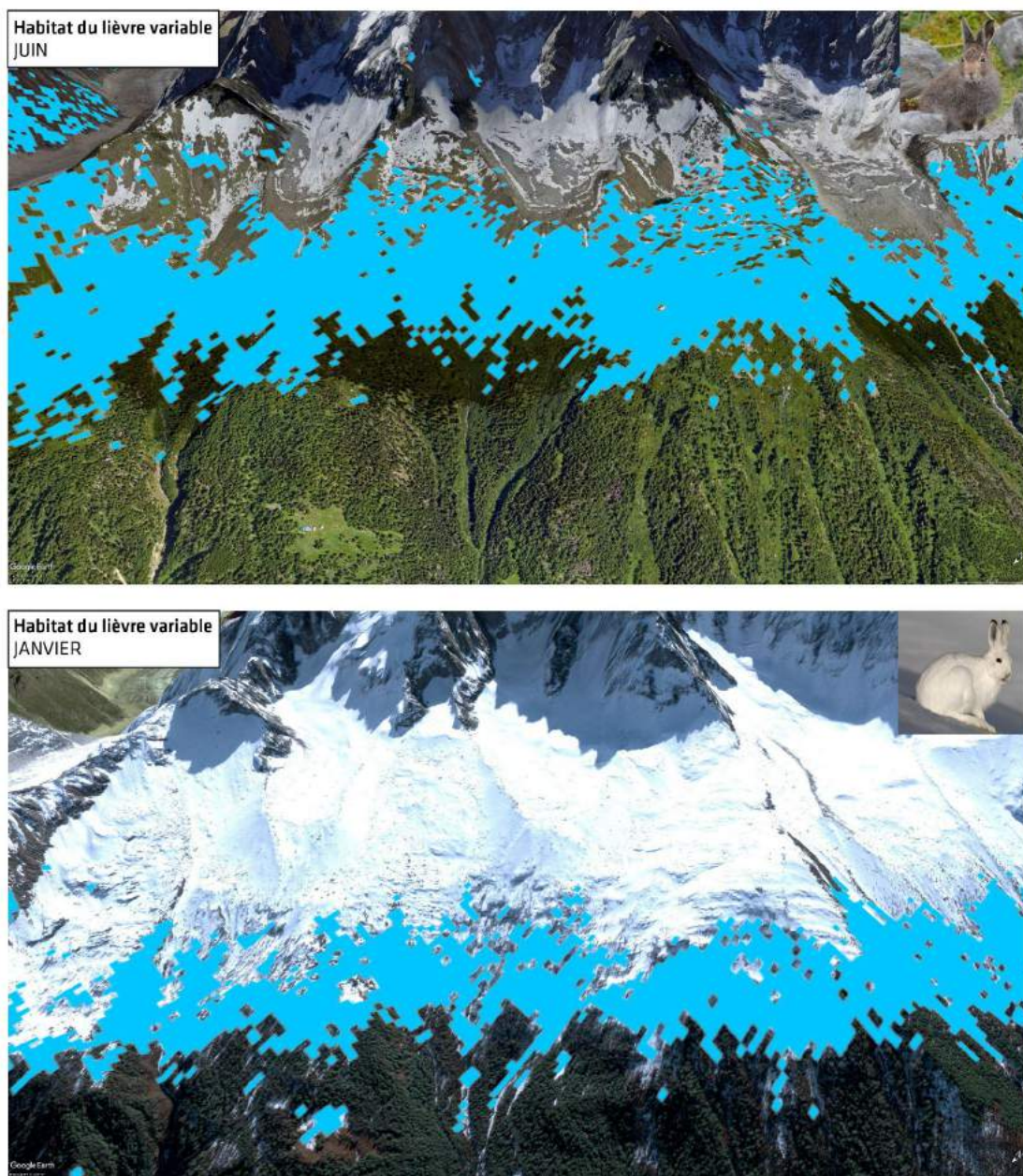


Figure 18. Cartes saisonnières de l'habitat majoritaire du lièvre variable, indiqué en bleu. Par habitat majoritaire, on entend l'habitat où l'espèce passe la plupart de son temps, même s'il est toujours possible qu'elle fréquente d'autres habitats. Comme cela a été montré par les pièges photo (Figure 10), le lièvre a tendance à passer l'hiver en lisière de forêt et ensuite monter en altitude pour passer plus de temps dans les

milieux mélangés de lande et de prairie au printemps et en début d'été. **La carte ORION permet de spatialiser les observations ponctuelles faites par piège photo à l'échelle du paysage.**

La figure 18 fournit un premier aperçu de cette approche pour le lièvre variable, en partant du constat que le lièvre a tendance à passer l'hiver en forêt et le début d'été dans des zones d'écotone lande-prairie. **Cette démarche permettrait de croiser les zones d'habitat majoritaire du lièvre (ou d'autres espèces) avec des données spatiales qui localisent différentes activités humaines (pastorales et touristiques), dans le but de favoriser un équilibre entre ces différents usages du paysage et au fil des saisons.** Dans un contexte où les contraintes augmentent pour la faune sauvage (réchauffement climatique, arrivée des espèces plus compétitrices de plus basse altitude comme le lièvre d'Europe, fréquentation plus importante de la montagne par les pratiquants), il semble d'autant plus important de disposer d'outils précis au niveau spatial et temporel afin d'optimiser les mesures de conservation, toujours en équilibre avec les impératifs touristiques du territoire. Disposer des cartes d'habitat majoritaire pour le lièvre variable ou d'autres espèces sensibles serait aussi un moyen de sensibiliser les pratiquants de montagne aux zones sensibles pour la faune, au-delà des zones de quiétude désignées et en fonction de la saison¹⁹.

V. Conclusion : la carte ORION, un nouvel outil pour le suivi du territoire

Par rapport à la problématique initiale de mieux appréhender l'expansion des landes sur le territoire de la CCVCMB, le projet ORION a fourni un certain nombre d'outils au service des gestionnaires des espaces naturels. Tout d'abord, nous avons produit une cartographie à haute précision (10 m) qui permet de distinguer les landes des autres types d'habitat (prairie, forêt et zones de transition). A notre avis, cette cartographie est largement supérieure aux produits existants à l'échelle de la France ([OSO](#)) ou de l'Europe ([CORINE](#)), à la fois grâce à la sélection des variables explicatives utilisées, la calibration locale de l'algorithme dans la vallée de Chamonix et aussi les classes d'habitat modélisées qui inclut les habitats de transition (limite de la forêt et écotone lande-prairie). Dans un deuxième temps, nous avons évalué certaines conséquences écologiques de l'expansion des landes sur i) la diversité floristique en milieu ouvert d'altitude, et ii) sur la disponibilité d'habitat majoritaire pour certaines espèces de faune sauvage (chamois et lièvre variable). Nous avons également identifié certaines zones à fort enjeu du point de vue de la gestion et de la conservation, notamment les alpages et les réserves naturelles.

Enfin, nous avons mis à disposition ces outils et indicateurs sur le site de [l'Atlas du Mont-Blanc](#), vitrine des changements écologiques en cours dans le massif du Mont-Blanc :

- à travers **une page "Enjeux"** intitulée [Prairies alpines, poches de résistance](#) qui présente le profil singulier du massif du Mont-Blanc et la rareté de la surface occupée par les prairies,
- à travers **une page "Indicateur"** intitulée [Suivi satellite d'une « surface pâturable »](#) qui présente l'indicateur de "surface pâturable"

Ces deux pages sont liées entre elles par des hyperliens, permettant de passer de la présentation des grands enjeux aux détails de la méthode de suivi utilisée, et vice versa (Figure 19). Elles sont issues d'une réécriture sur-mesure, afin de présenter les résultats du projet ORION **en cohérence avec la ligne éditoriale du site web**. Un travail graphique a été réalisé en complément pour produire une ressource visuelle attractive et diffusable sous forme d'image, présentant les différentes classes d'habitat dans le massif et la part de "surface pâturable" dans une sélection d'alpages. D'autre part, un travail d'intégration web a été réalisé **pour mettre à disposition la carte des classes d'habitats de manière interactive** (Figure 20), sur fond de carte OpenStreetMap.

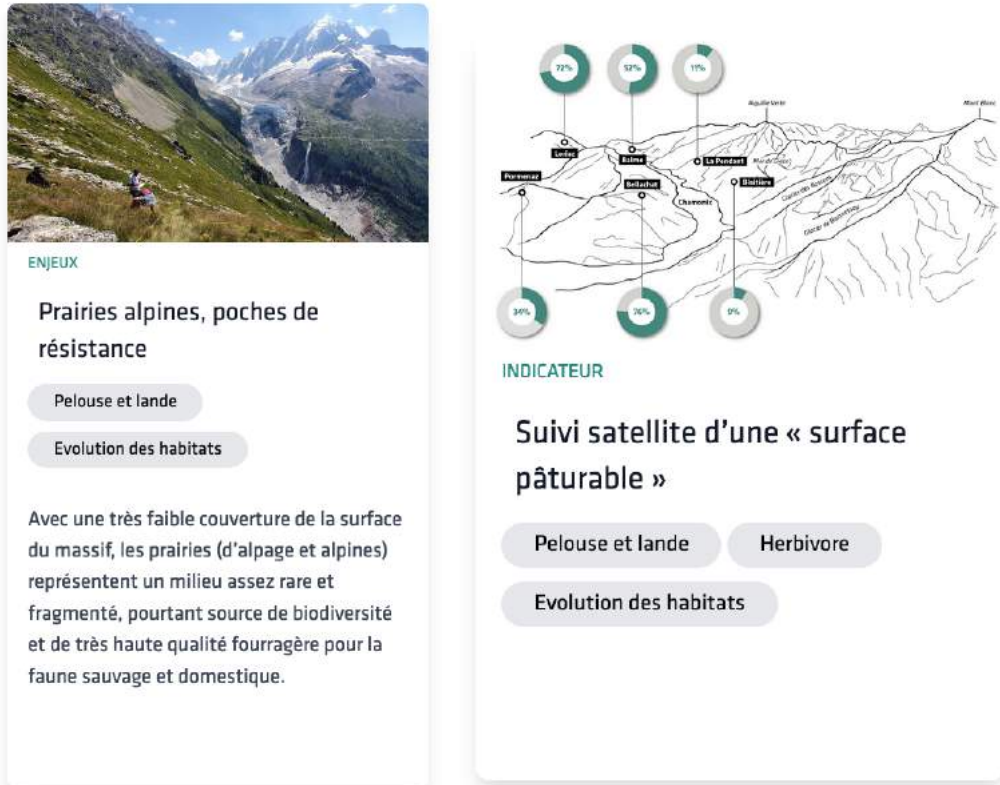


Figure 19. Captures d'écran des vignettes illustratives des deux pages concernées sur l'Atlas du Mont-Blanc : à gauche, la page "Enjeux" ; à droite, la page "Indicateur". Ces deux pages sont liées entre elles par des hyperliens cliquables.

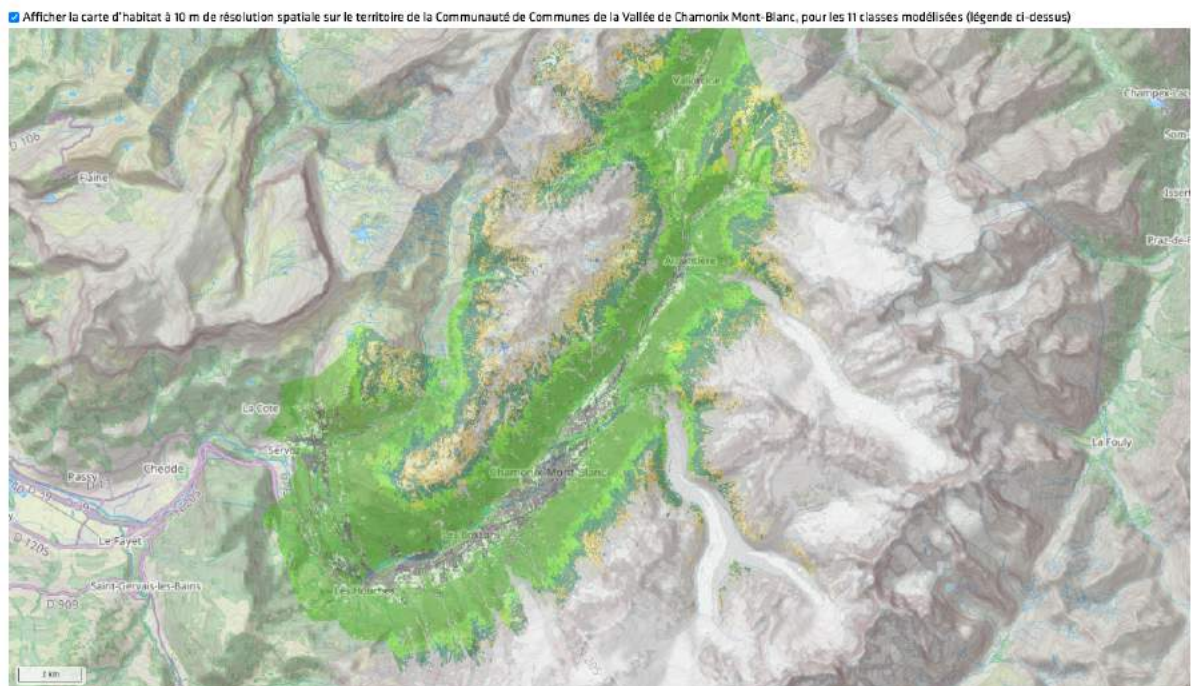


Figure 20. Carte d'habitat finale à 10 m de résolution spatiale sur le territoire de la CCVCMB pour les 11 classes modélisées, affichée de manière interactive sur l'Atlas du Mont-Blanc, sur fond de carte OpenStreetMap.

Nous résumons ainsi les principaux apports du projet au territoire :

1. **Outil d'aide à la décision pour la gestion des alpages**
2. **Outil de suivi de l'évolution des habitats, en particulier dans les réserves naturelles**
3. **Outil d'aide à la conservation pour des espèces de faune sensible** (lièvre variable dans un premier temps, mais extension possible à d'autres espèces)

L'étape suivante sera d'intégrer les outils produits par le projet ORION auprès des gestionnaires dans une démarche de suivi et monitoring adaptatif du territoire. La gestion adaptative croise les connaissances (ou besoin de connaissances) scientifiques avec des objectifs de gestion, dans le but de définir les actions de gestion pertinentes et de mesurer leur efficacité grâce à des indicateurs écologiques (Figure 21)²⁰. La carte ORION pourrait servir à consolider cette démarche dans les années à venir, en complément d'autres informations (données climatiques et d'usage, ou d'activité de la faune sauvage). En général, la démarche adaptative se décline en quatre étapes²¹ :

1. **Définir le problème**
2. **Articuler l'objectif de gestion associé**
3. **Identifier les actions possibles, considérer leurs conséquences écologiques potentielles et choisir celle(s) à mettre en oeuvre**
4. **A la lumière d'un ou plusieurs indicateurs écologiques, évaluer l'efficacité des actions de gestion mises en oeuvre et les ajuster si nécessaire**

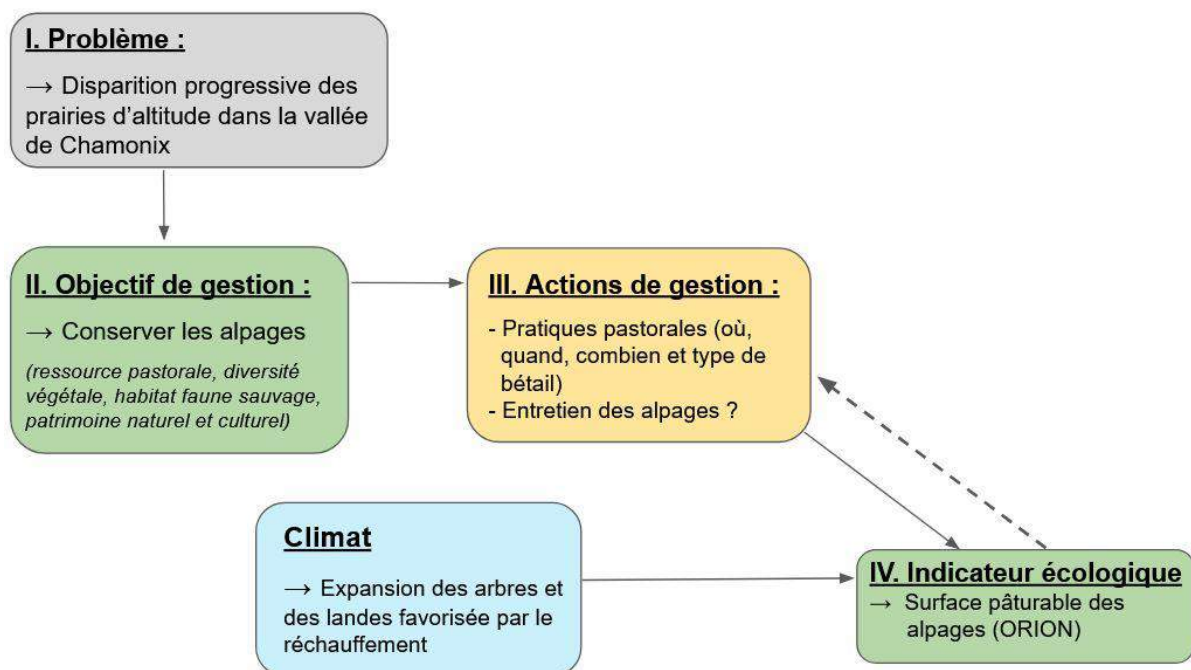


Figure 21. Schéma qui présente un exemple de démarche de suivi adaptatif des alpages de la vallée de Chamonix, avec pour objectif de préserver les prairies d'altitude restantes dans la vallée. **Un indicateur de "surface pâturable" permettrait d'évaluer l'efficacité des mesures de gestion, et de tenir également compte de l'évolution des milieux face au changement climatique.** La flèche en pointillée indique la boucle adaptative, dans laquelle l'indicateur sert à informer la prise de décision et à ajuster les actions de gestion si nécessaire. Il faut préciser que ce schéma est hypothétique et sert à illustrer la démarche ; il faudrait valider ces objectifs auprès des gestionnaires et idéalement quantifier la dynamique historique de la surface des prairies dans la vallée de Chamonix afin de mieux contextualiser la problématique de la régression des prairies.

Les avancées du projet ORION pourrait également servir à informer des efforts transfrontaliers de développement durable menés au niveau de l'[Espace Mont-Blanc](#) entre la Haute-Savoie et la Savoie (FR), la région autonome de la vallée d'Aoste (IT) et le canton du Valais (CH). La problématique de l'expansion des landes traitée dans ce rapport est aussi pertinente sur les versants suisses et italiens du massif, notamment en lien avec les objectifs de la conservation de la biodiversité, le maintien des activités pastorales et également la recherche d'équilibre entre la fréquentation touristique et la préservation de la faune sauvage. La remontée de la forêt aux dépens des milieux ouverts d'altitude est également une problématique à fort enjeu pour l'ensemble du territoire, identifié dans [la feuille de route de l'EMB face au changement climatique](#). Enfin, la carte ORION appliquée à l'EMB permettrait un suivi de l'évolution de la surface glaciaire et des écosystèmes émergents suite au retrait glaciaire dans les milieux de haute montagne.

Même si elle représente des avancées méthodologiques importantes, les cartes actuelles des milieux naturels de la vallée de Chamonix et de l'Espace Mont-Blanc possèdent un intérêt limité au constat de la situation aujourd'hui. Nous sommes convaincus que la mise à jour régulière de la cartographie tout au long de la mission des satellites Sentinel-2, en utilisant le modèle calibré dans ce projet, permettra un suivi précis de l'évolution des habitats et de mieux comprendre leur dynamique face au changement climatique et en lien avec les activités humaines dans les années à venir. La mise en place d'indicateurs écologiques, par exemple en lien avec la gestion pastorale, permettrait d'évaluer l'efficacité des mesures de gestion engagées dans une démarche de gestion adaptative **A nos yeux il s'agit d'un outil à haut potentiel, mobilisant les connaissances académiques les plus à la pointe au service des acteurs du territoire**. Enfin, nous recommandons de poursuivre les analyses croisées entre l'observation de la faune par piège photo et la caractérisation des habitats favorables à l'échelle du paysage avec ORION, à la fois en appliquant la démarche à d'autres espèces (par exemple le lagopède ou le chamois) et aussi en intégrant des propriétés fonctionnelles telle que la hauteur de la végétation, la qualité de la ressource fourragère ou encore la fréquentation humaine dans l'espace et dans le temps.

VI. Communication autour du projet ORION

Grâce au soutien de l'équipe du SCO France, le projet a bénéficié des supports suivants de communication :

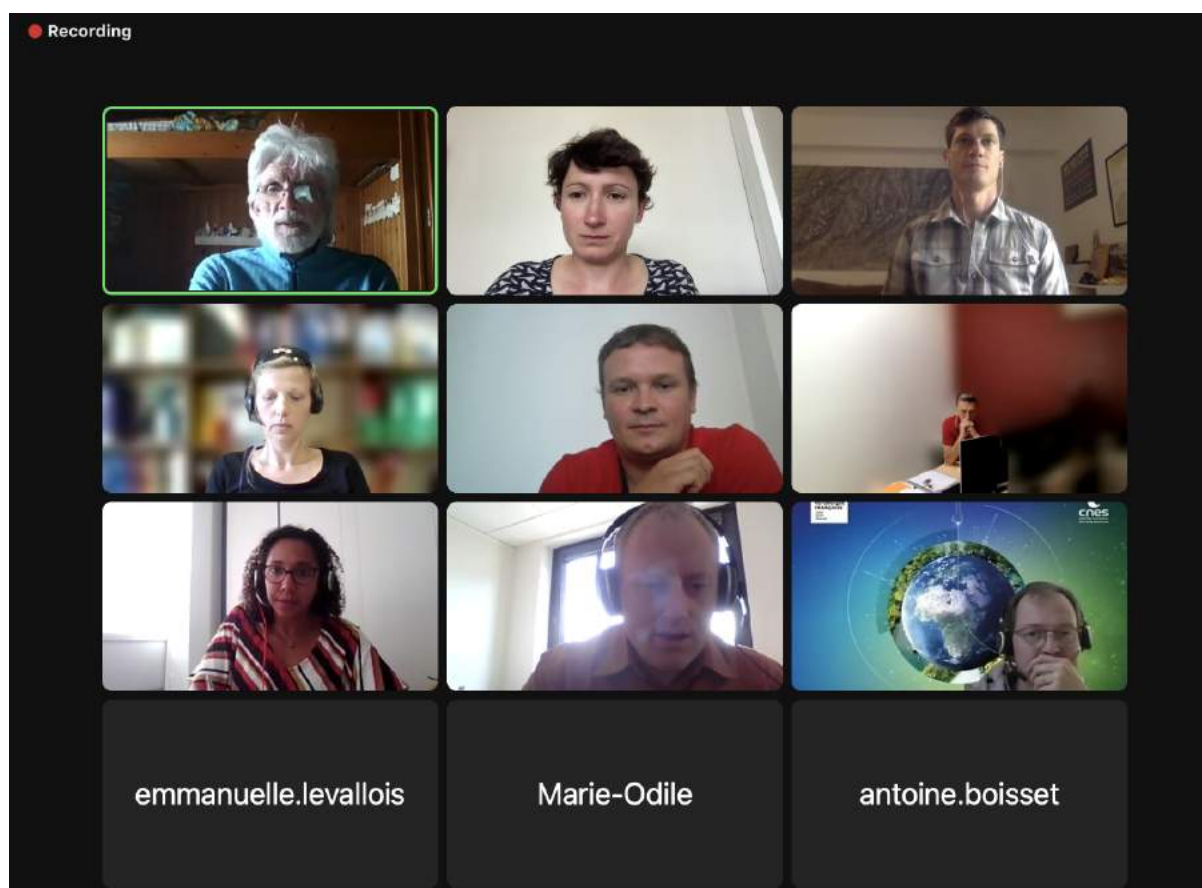
- [Vidéo explicative du projet](#)
- [Page descriptive du projet sur le site du SCO France](#)
- [Article sur le kickoff meeting du projet en automne 2021](#)
- [Présentation du projet lors de la Trimestrielle des projets SCO le 27/9/2022](#)

D'autres présentations du projet ORION ont été réalisées :

- Dans le cadre de la Semaine de l'Espace organisé [par la société LYNRED](#) le 06/10/2022
- [Lors du colloque scientifique PASTORAL au Fort de Bard le 16/3/2023](#)
- Sur [le site web institutionnel](#) du CREA Mont-Blanc

Nous avons également participé à plusieurs réunions d'échange avec Asters et la CCVCMB afin d'adapter le projet à leurs besoins et de les tenir informés des résultats :

- Réunion de lancement (kickoff) le 16/11/2021
- Réunion de comité de suivi le 8/11/2022
- Restitution auprès de la CCVCMB le 28/6/2023
- WindUp Meeting, restitution finale rassemblant tous les acteurs du projet, le 20/09/2023 ([prendre connaissance des questions / réponses](#) posées en séance)



VII. Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement les stagiaires et bénévoles qui nous ont aidés sur le terrain et qui ont rendu ce travail possible : Amaury Berger, Emilie Lab, Pascal Nègre, Aëlig Créno, Estelle Solem, Ben Robson, Sandrine Goulmy, Elsa Ostlund, Maeva Youf, Nadine Gex et Sebastian Fischbach.

Ce projet a été financé par l'Office français de la biodiversité ([OFB](#)) dans le cadre du Space Climate Observatory ([SCO France](#)). Merci à Aurélie Sand du CNES qui a servi de référent scientifique du projet, et également à Frédéric Bretar (SCO) et à François Hissel (OFB) pour leur suivi et soutien du projet. Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement Karol Barthelemy et Cécile Losada pour leur implication pendant toute la durée du projet et d'avoir rendu les résultats d'ORION visibles auprès de la communauté du SCO.

VIII. Bibliographie

1. Bayle, A., Carlson, B. Z., Thierion, V., Isenmann, M., & Choler, P. (2019). Improved mapping of mountain shrublands using the sentinel-2 red-edge band. *Remote Sensing*, *11*(23), 2807.
2. Anthelme, F., Villaret, J. C., & Brun, J. J. (2007). Shrub encroachment in the Alps gives rise to the convergence of sub-alpine communities on a regional scale. *Journal of Vegetation Science*, *18*(3), 355-362.
3. Pittarello, M., Lonati, M., Gorlier, A., Perotti, E., Probo, M., & Lombardi, G. (2018). Plant diversity and pastoral value in alpine pastures are maximized at different nutrient indicator values. *Ecological Indicators*, *85*, 518-524.
4. Cannone, N., Sgorbati, S., & Guglielmin, M. (2007). Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *5*(7), 360-364.
5. Myers-Smith, I.H., Forbes, B.C., Wilmking, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., Tape, K.D., Macias-Fauria, M., Sass-Klaassen, U., Lévesque, E. and Boudreau, S. (2011). Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*, *6*(4), 045509.
6. Francon, L., Corona, C., Till-Bottraud, I., Choler, P., Carlson, B.Z., Charrier, G., Améglio, T., Morin, S., Eckert, N., Roussel, E. and Lopez-Saez, J. (2020). Assessing the effects of earlier snow melt-out on alpine shrub growth: The sooner the better?. *Ecological Indicators*, *115*, 106455.
7. Cremonese E., Carlson B., Filippa G., Pogliotti P., Alvarez I., Fosson JP., Ravanel L. & Delestrade A. AdaPT Mont-Blanc : Rapport Climat: Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines. Rédigé dans le cadre du projet AdaPT Mont-Blanc financé par le Programme européen de coopération territoriale Alcotra Italie-France 2014-2020. Novembre, 2019.
8. Liste rouge de la flore vasculaire de Rhône-Alpes (2015). Conservatoires botaniques nationaux alpin et du Massif central.
9. Dedieu, J. P., Carlson, B. Z., Bigot, S., Sirguey, P., Vionnet, V., & Choler, P. (2016). On the importance of high-resolution time series of optical imagery for quantifying the effects of snow cover duration on alpine plant habitat. *Remote Sensing*, *8*(6), 481.
10. Gilbert, N. A., Clare, J. D., Stenglein, J. L., & Zuckerberg, B. (2020). Abundance estimation of unmarked animals based on camera-trap data. *Conservation Biology*.
11. Gascoin, S., Grizonnet, M., Bouchet, M., Salgues, G., & Hagolle, O. (2019). Theia Snow collection: High-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*, *11*(2), 493-514.
12. Vernay, M., Lafaysse, M., Monteiro, D., Hagenmuller, P., Nheili, R., Samacoïts, R., Verfaillie, D. and Morin, S. (2022). The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data*, *14*(4), 1707-1733.
13. Escadafal, R., Girard, M. C., & Courault, D. (1989). Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*, *27*(1), 37-46.
14. Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, *58*(3), 257-266.
15. Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheifinger, H., Tagesson, T., T., Smets, B., Van Hoolst, R., Bonte, K., Ivits, E. & Eklundh, L. (2021). Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, *260*, 112456.
16. Böhner, J., & AntoniĆ, O. (2009). Land-surface parameters specific to topo-climatology. *Developments in Soil Science*, *33*, 195-226.
17. Myers-Smith, I. H., & Hik, D. S. (2013). Shrub canopies influence soil temperatures but not nutrient dynamics: an experimental test of tundra snow–shrub interactions. *Ecology and Evolution*, *3*(11), 3683-3700.
18. Patthey, P., Signorell, N., Rotelli, L., & Arlettaz, R. (2012). Vegetation structural and compositional heterogeneity as a key feature in Alpine black grouse microhabitat selection: conservation management implications. *European Journal of Wildlife Research*, *58*(1), 59-70.

19. Bakhache, C. & Fournés, A. L'intégration d'une culture environnementale aux sorties encadrées en hiver. Compte rendu de réunion le 4/5/2023.

20. Lindenmayer, D. B., & Likens, G. E. (2009). Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 482-486.

21. Ims, R. A., & Yoccoz, N. G. (2017). Ecosystem-based monitoring in the age of rapid climate change and new technologies. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 29, 170-176.

IX. Annexes

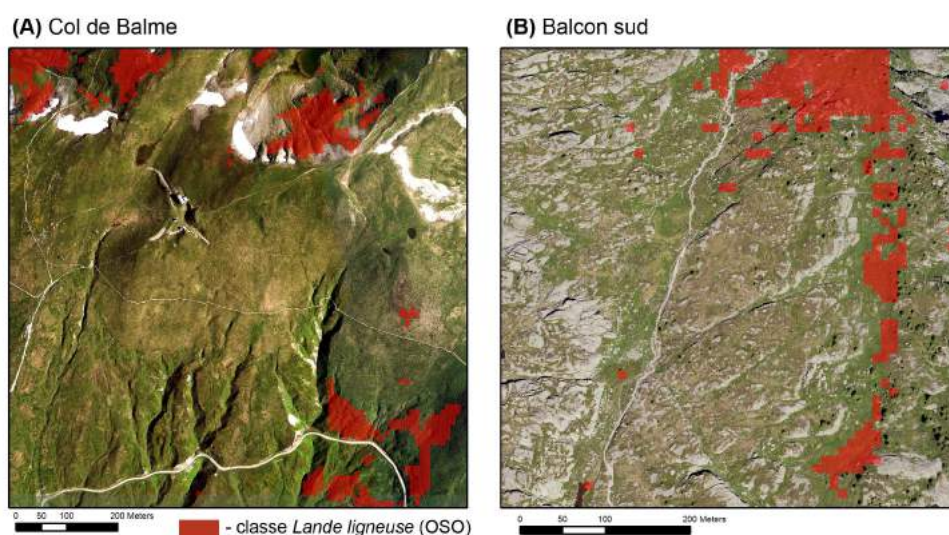


Figure A1. Exemples du [produit land cover OSO](#) du THEIA pour la classe "lande ligneuse" (indiquée en rouge) au **(A)** Col de Balme et **(B)** sur le balcon S des Aiguilles Rouges. De nombreux patches de lande, qui correspondent à des zones de vert foncé, ne sont pas détectés par cette classification d'où le besoin d'améliorer les outils proposés aux gestionnaires et décideurs.

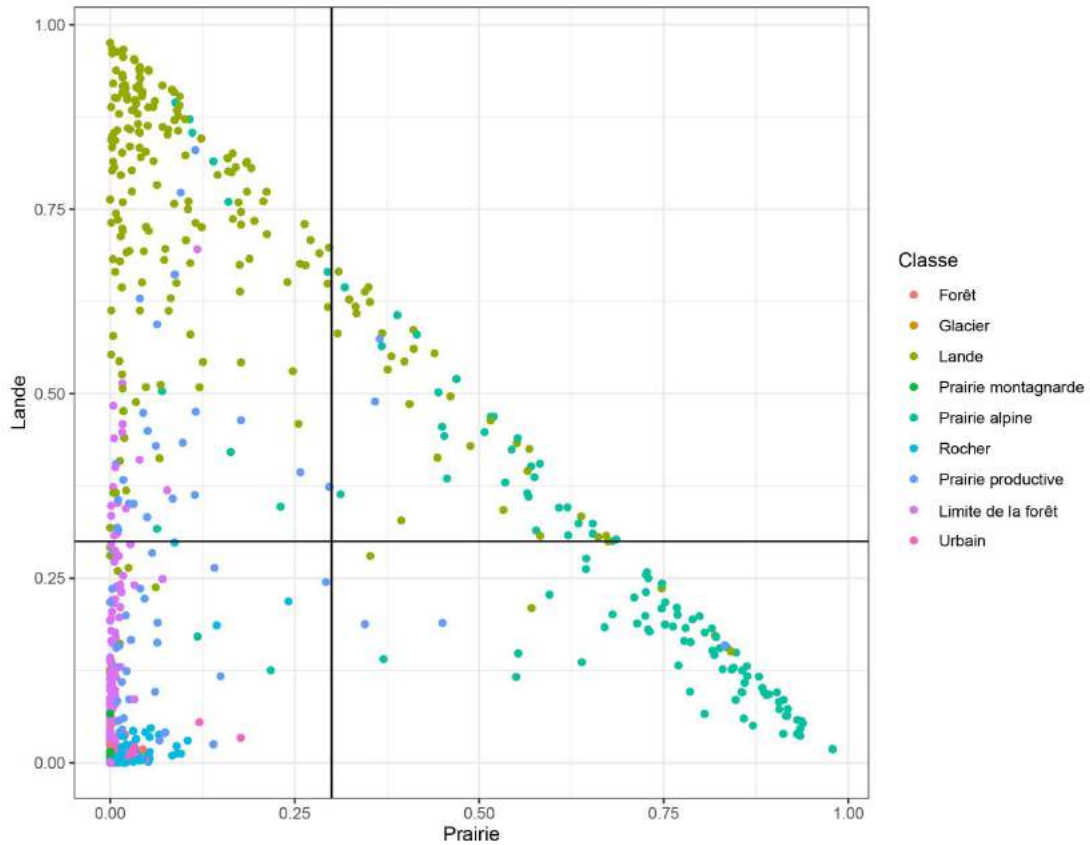


Figure A2. Plot de la probabilité de classification en tant que prairie vs. lande pour l’ensemble des points d’entraînement ($N = 883$). Les traits indiquent des seuils de probabilité de 0,3 : si le modèle a prédit une valeur de probabilité supérieure à 0,3 à la fois pour la lande et la prairie, à ce moment nous avons assigné le pixel à une nouvelle classe “écotone lande-prairie” (Figure 4).

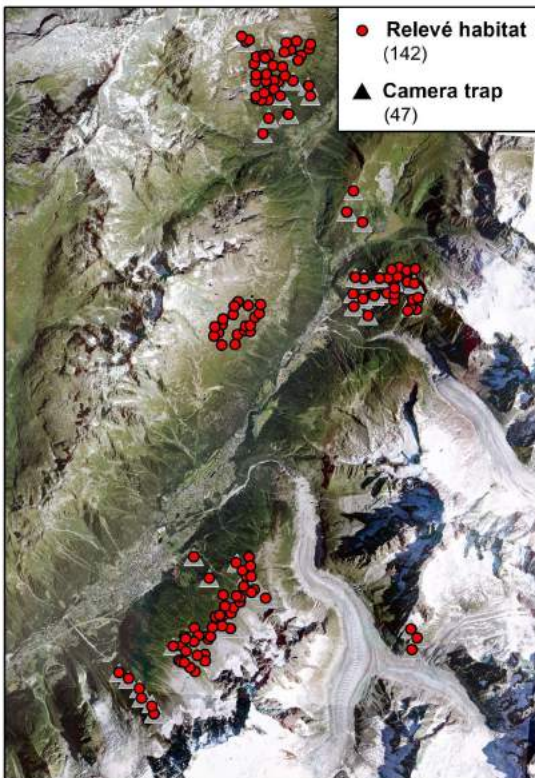


Figure A3. Localisation des 142 relevés d’habitat effectués en été 2022 (point rouges) et des 47 pièges photo (triangles gris) installés entre 2018 et 2022. Nous avons réalisé les relevés d’habitat systématiquement devant les pièges photo (dans la zone de prise de vue), et par ailleurs au sein d’une maille de 250 x 250 m afin d’assurer une répartition spatiale entre les relevés.

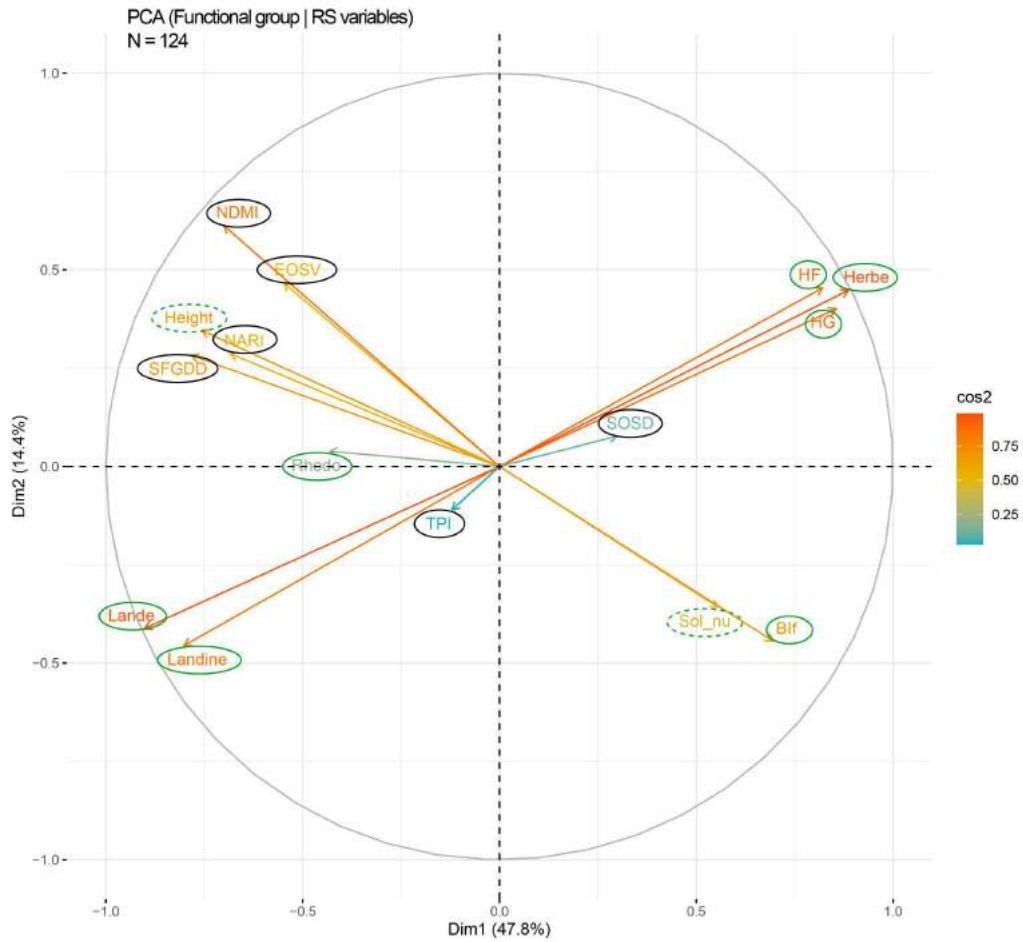


Figure A4. Cercle de corrélations entre les variables explicatives spatiales (Tableau 1) et les groupes et propriétés fonctionnels de végétation mesurés sur le terrain, issus d’une analyse ACP (Principal Component Analysis). A noter que les variables explicatives SF-GDD, NARI et BI sont fortement corrélées avec la hauteur de la végétation, ce qui rend possible la modélisation montrée dans la Figure 12. En occurrence, aucune variable explicative n’est corrélée avec les groupes fonctionnels de lande haute à rhododendron et de lande basse à *Vaccinium* spp., ce qui a découragé nos efforts pour essayer de modéliser plusieurs types de lande.

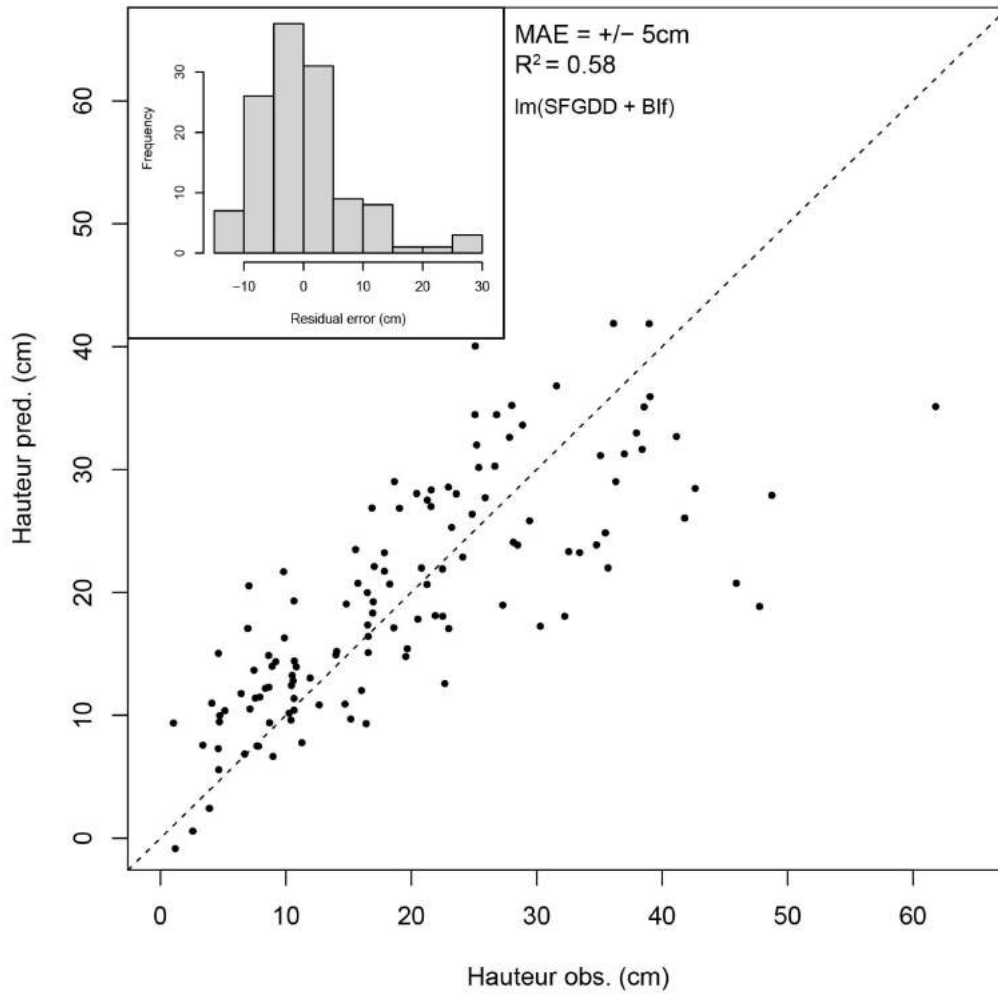


Figure A5. Bi-plot de la hauteur de canopée végétale observée sur le terrain et prédite par un modèle linéaire basé sur la somme des degrés jours sans neige (SF-GDD) et l'indice de luminosité du sol (Bif). L'erreur est bien répartie, à l'exception de quelques points avec une forte hauteur observée qui montrent un fort résidu positif. Ces points mériteraient un regard supplémentaire pour mieux comprendre ce qui peut expliquer ces écarts.

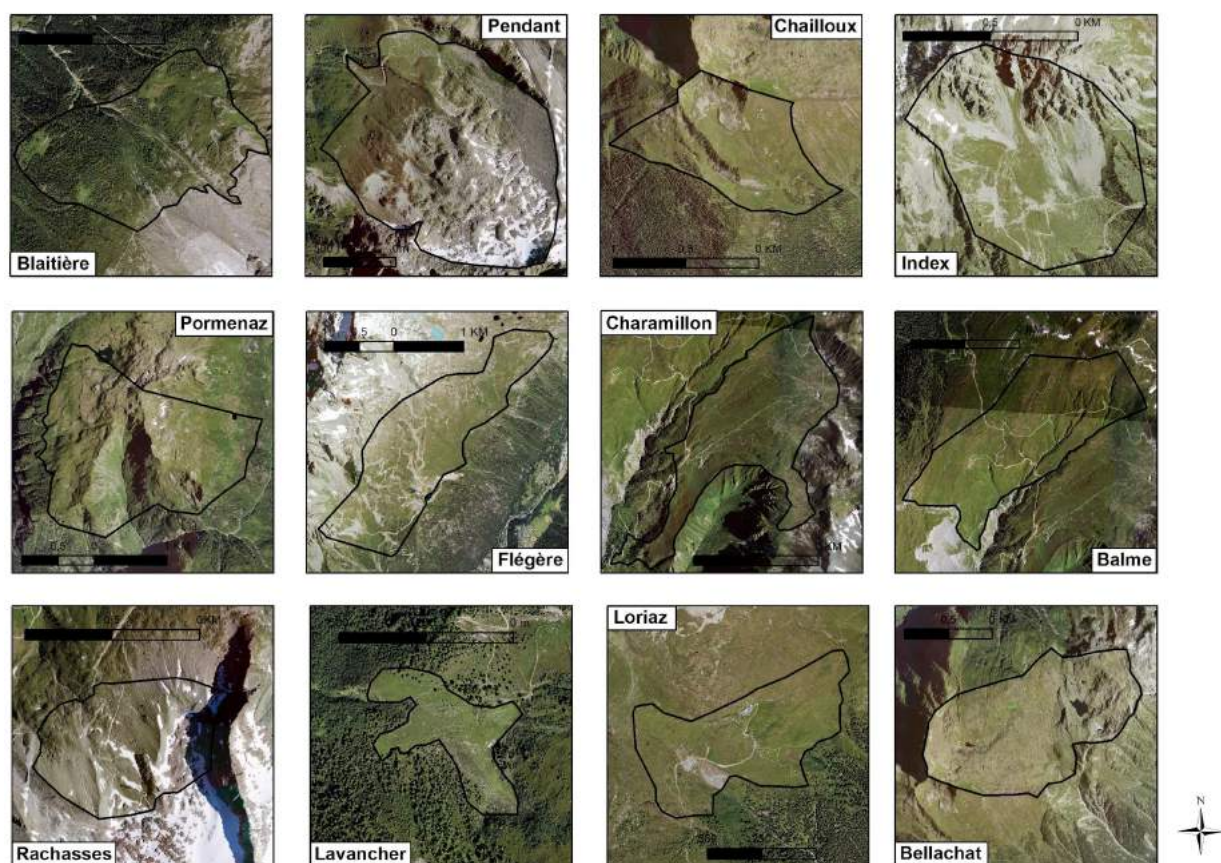


Figure A6. Photos aériennes des différents alpages de la vallée de Chamonix en complément des figures 14-15.

	Mean Decreasing Accuracy	Mean Decreasing Gini
SFGDD	0,21	141,60
BI	0,20	120,66
NDMI	0,15	107,92
SOSD	0,16	103,48
NARI	0,13	100,49
EOSV	0,12	92,60
DAH	0,04	48,58
TPI	0,02	36,22

Tableau A1. Les variables explicatives classées en fonction de leur capacité prédictive (Accuracy et Gini coefficient), toutes classes confondues.

Annexe S1. Calcul des degrés jours sans neige (SF-GDD)

Afin d'estimer la variable bioclimatique SF-GDD, nous avons croisé deux sources d'information : les cartes de durée d'enneigement générées par le CESBIO à partir des séries temporelles d'images Landsat et Sentinel-2 et disponibles sur le site du [pôle THEIA](#)¹¹, et les séries de température modélisées pour les massifs français par Météo-France et le Centre d'Etudes de la Neige¹². La première étape a consisté à télécharger les cartes de durée d'enneigement (SMOD) pour la région de l'Espace Mont-Blanc et pour chaque année de 2017 à 2021. Ensuite, à partir des températures moyennes journalières, le calcul suivant a été réalisé pour chaque pixel de la zone d'étude : extraire le premier jour sans neige, et ensuite faire la somme des températures journalières au-dessus de 0°C à partir de cette date et jusqu'au 31 juillet. A partir des cinq rasters annuels de la somme des degrés jours sans neige (SF-GDD), nous avons calculé la valeur moyenne de SF-GDD pour chaque pixel. Cette dernière carte a servi de variable explicative dans le modèle prédictif des habitats.

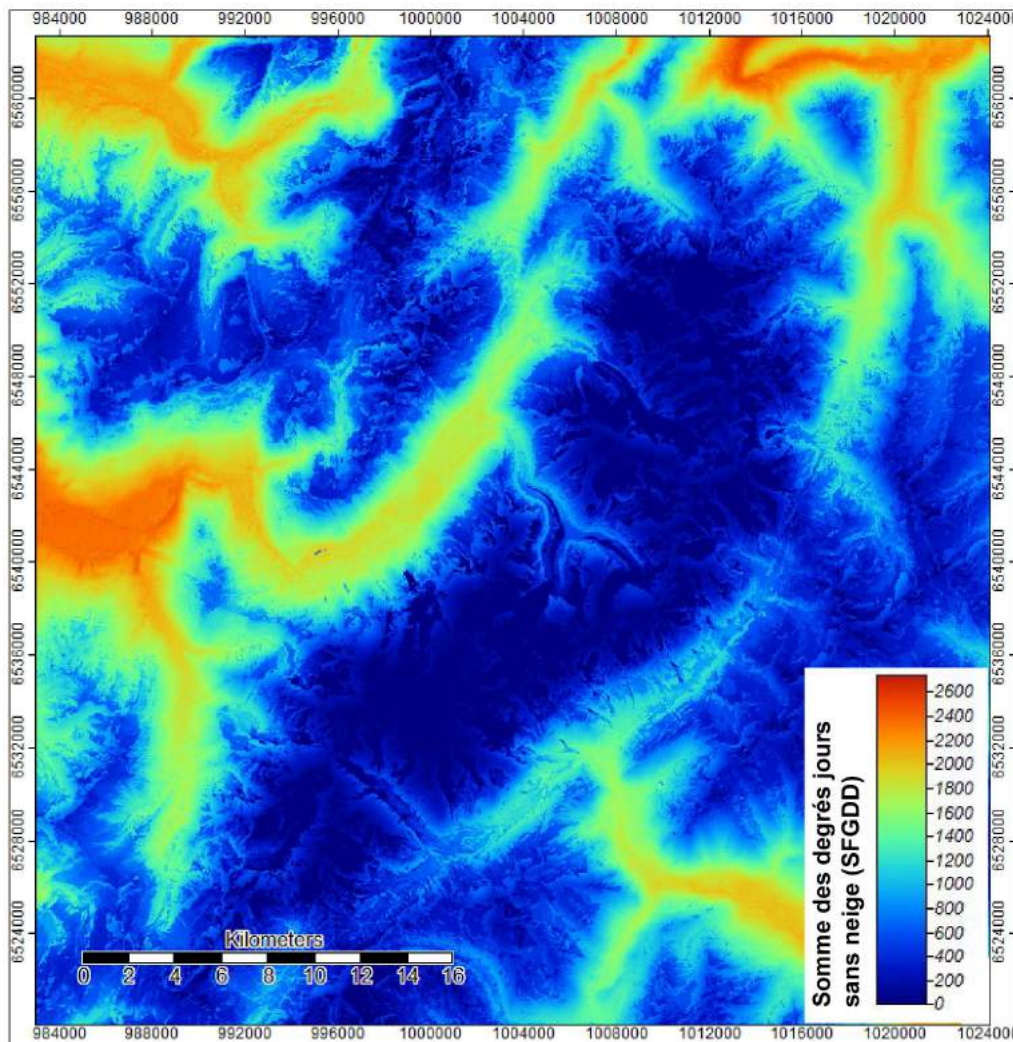


Figure A7. Exemple de carte de degrés jours sans neige dans le massif du Mont-Blanc pour l'année 2018. La quantité de degrés jours disponibles est fortement liée à l'altitude, mais aussi à la topographie (moraines, arêtes...) et aux zones de dépôt de neige par les avalanches, comme on peut voir dans les couloirs au pied du versant sud du mont Blanc.