

Institut des Géosciences de l'Environnement – Jardin du Lautaret

Dynamique d'évolution de l'indice NDVI et des patrons spatio-temporels de végétation : exemple de la tour ICOS du Lautaret

Rapport de stage de 2ème année d'école d'ingénieur agronome



Institut des Géosciences de
l'Environnement



Stage encadré par Didier Voisin, enseignant – chercheur à l'Institut des Géosciences de l'Environnement

UGA - IGE
CS 40700
38 058 Grenoble Cedex 9

Du 29 mai au 8 septembre 2023

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Didier Voisin, pour son accompagnement tout au long de ce stage, sa disponibilité, son écoute attentive et ses conseils, toujours précieux et bienveillants. La confiance et la liberté qu'il m'a accordées m'ont parfaitement convenu, et ont beaucoup contribué à la belle réussite de ce stage.

J'adresse aussi de sincères remerciements à toute l'équipe du Jardin du Lautaret, en particulier Jérôme Forêt, d'une bienveillance rare, pour son soutien lors de mes nombreux séjours au Jardin, et Lucie Liger, pour son aide essentielle lors de mes manipulations expérimentales.

Je remercie tout particulièrement Maxime Rome, qui, en plus de son expertise indispensable sur le terrain, m'a ouvert les portes de la botanique, un monde que je commence désormais à explorer avec passion. Sa présence au jardin et son amitié ont beaucoup compté.

Je remercie également Philippe Choler, qui par ses conseils importants et avisés, m'a guidé au cours de mon étude.

Enfin, je remercie vivement Jean-Gabriel Valay, pour sa réactivité et sa disponibilité, et sans qui ce stage n'aurait jamais pu avoir lieu.

Résumé

L'Université Grenoble Alpes, par le biais de l'Institut des Géosciences de l'Environnement et du jardin du Lautaret, fait depuis peu partie du réseau ICOS, Integrated Carbon Observation System, infrastructure de recherche européenne dont l'objectif est de suivre les flux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Dans le cadre de ce programme, le Jardin du Lautaret, jardin botanique d'altitude associé à l'UGA, a été désigné comme station de mesure et une tour de mesure de flux a été installée sur le site. Le programme ICOS requiert de ses stations un apport régulier, précis et rigoureux de différentes données, dont la nature dépend du type de station. Dans le cas du jardin du Lautaret, l'exigence du programme ICOS se limite au suivi de quelques indicateurs de croissance de la végétation. C'est pour réaliser ce suivi que ce stage a été imaginé.

Ce stage s'est déroulé sous la tutelle de deux entités, l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) et le jardin du Lautaret, elles-mêmes sous l'égide de l'Université Grenoble Alpes (UGA), du CNRS et de l'INRAE, entre autres. Une partie du temps a été consacré à la récolte de données sur le terrain, sur le site de la tour ICOS au col du Lautaret, avec le soutien important de l'équipe du Jardin du Lautaret, tandis que l'analyse des données s'est déroulée dans les locaux de l'IGE, sur le campus de l'UGA à Saint-Martin-d'Hères.

L'objectif initial du stage était d'effectuer le suivi d'indicateurs de développement végétatif (LAI, AGB, NDVI), ainsi que des relevés botaniques, sur la période de croissance de la végétation, de juin à août 2023, sur une série de points d'échantillonnage dans une zone définie autour de la tour ICOS du jardin du Lautaret. Cependant, une partie importante de l'analyse s'est concentrée sur l'exploitation de données satellitaires, hyperspectrales, géospatiales et topographiques pour le suivi et l'analyse de plusieurs indices de végétation et de différentes variables, dont l'influence sur ces indices a été testée.

Cette étude vise à caractériser la répartition et la diversité des espèces composant le couvert végétal sur la zone de mesure. La dynamique de développement, spatiale et temporelle, du couvert végétal a également été déterminée, au travers d'un indicateur de croissance principal de la végétation, le NDVI (Normalized Vegetation Index). Cette dynamique de développement a été observée et comparée à différentes échelles de temps : au sein d'une année, entre les années et entre les deux dernières décennies. Par ailleurs, les liens entre la composition du couvert végétal, la dynamique de développement du NDVI et différentes variables (durée d'enneigement, microtopographie, conditions météorologiques, indices de végétations hyperspectraux) ont été mis en évidence. Une carte de répartition des différentes espèces et couverts végétaux caractéristiques a été produite sur la zone de mesure.

Summary

The Université Grenoble Alpes, through the Institut des Géosciences de l'Environnement and the Jardin du Lautaret, has recently joined the ICOS (Integrated Carbon Observation System) network, a European research infrastructure whose aim is to monitor the flow of greenhouse gases in the atmosphere. As part of this program, the Jardin du Lautaret, a high-altitude botanical garden associated with the UGA, has been designated as a measuring station, and a flux-measuring tower has been installed on the site. The ICOS program requires its stations to provide regular, precise and rigorous data, the nature of which depends on the type of station. In the case of the Jardin du Lautaret, the ICOS program's requirements are limited to monitoring a few vegetation growth indicators. It was to carry out this monitoring that this internship was conceived.

The internship took place under the aegis of two entities, the Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) and the Jardin du Lautaret, themselves under the aegis of the Université Grenoble Alpes (UGA), CNRS and INRAE, among others. Part of the time was spent collecting data in the field, on the site of the ICOS tower at Col du Lautaret, with considerable support from the Jardin du Lautaret team, while data analysis took place on the IGE premises, on the UGA campus in Saint-Martin-d'Hères.

The initial objective of the internship was to monitor vegetation development indicators (LAI, AGB, NDVI), as well as botanical surveys, over the vegetation growth period, from June to August 2023, on a series of sampling points in a defined area around the ICOS tower in the Jardin du Lautaret. However, an important part of the analysis focused on the exploitation of satellite, hyperspectral, geospatial and topographic data for the monitoring and analysis of several vegetation indices and different variables, whose influence on these indices was tested.

The aim of this study was to characterize the distribution and diversity of species making up the vegetation cover in the measurement area. The spatial and temporal development dynamics of the vegetation cover were also determined, using the NDVI (Normalized Vegetation Index) as the main vegetation growth indicator. This development dynamic was observed and compared on different time scales: within a year, between years and between the last two decades. In addition, the links between plant cover composition, NDVI development dynamics and various variables (duration of snow cover, microtopography, meteorological conditions, hyperspectral vegetation indices) were highlighted. A distribution map of the various characteristic plant species and cover was produced for the measurement area.

Table des illustrations

Figure 1. Répartition des stations membres du réseau ICOS dans le monde.....	p.2
Figure 2. Représentation des aires d'origines géographiques de différents pourcentages de la variabilité mesurée au niveau de la tour ICOS....	p.4
Figure 3. Schéma d'organisation du protocole de mesure de l'indice LAI.....	p.5
Figure 4. Evolution de la valeur de l'indice NDVI sur 19 points d'échantillonnage de la zone de mesure au cours de la période avril – octobre 2022.....	p.10
Figure 5. Carte de mise en classe en deux clusters de l'évolution du NDVI sur la période 1 sur l'année 2022 (A) et état du couvert neigeux au 19 avril 2022 (B).....	p.11
Figure 6. Cartes de mises en classes en trois clusters de l'évolution du NDVI sur la période 2 au cours de l'année 2022 (A), 2021 (B) et 2019 (C).....	p.12
Figure 7. Série temporelle de l'évolution de l'indice NDVI sur la zone de mesure sur la période avril – octobre 2022.....	p.12
Figure 8. Comparaison interannuelle de l'évolution de l'indice NDVI sur la période de croissance sur les années 2018 à 2022.....	p.13
Figure 9. Variabilités interannuelles de plusieurs variables météorologiques calculées selon les données satellitaires Sentinel – 2 et Landsat (date de début de fonte) ou récoltées par la station météorologique du col du Lautaret (A) et variabilité interannuelle de la pluviométrie mensuelle sur la période avril – septembre (B) sur la période 2018 – 2022.....	p.13
Figure 10. Courbes d'évolutions moyennes du NDVI durant la décennie 2000 – 2010 (bleu) et 2011 – 2022 (rouge) sur la période de croissance de la végétation, calculées sur la zone de mesure du site de l'étude avec les données satellitaires MODIS.....	p.14
Figure 11. Comparaison de différents indicateurs environnementaux entre les deux dernières décennies, 2000 – 2010 et 2011 – 2022, calculées selon les données satellitaires MODIS.....	p.15
Figure 12. Répartition des espèces recensées sur les points d'échantillonnage de la zone de mesure en 4 classes de fréquences d'observations : rares, peu fréquentes, moyennement fréquentes et fréquentes.....	p.15
Figure 13. Répartition des espèces majoritaires recensées sur les points d'échantillonnage de la zone de mesure.....	p.16
Figure 14. Comparaison de plusieurs indicateurs de dominance des trois espèces les plus abondantes sur la zone de mesure : <i>Festuca paniculata</i> , <i>Festuca rubra</i> et <i>Meum athamanticum</i>	p.16
Figure 15. Analyse de corrélation du pourcentage d'abondance de l'espèce <i>Festuca rubra</i> sur les 20 points d'échantillonnage, en fonction de deux indices environnementaux : l'indice de Shannon (A) et l'indice d'équitabilité (B).....	p.16
Figure 16. Analyse des correspondances, résultats de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) sur l'abondance relative des espèces végétales sur chaque points d'échantillonnage, et contributions des deux dimensions principales de l'étude sur les points (A) et sur les espèces végétales (B).....	p.17
Figure 17. Graphique de contributions des points d'échantillonnage aux deux dimensions principales de l'étude, suite à une clustérisation sur l'abondance des espèces végétales sur chaque points avec la méthode PAM.....	p.18
Figure 18. Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique selon les données d'abondances relatives des espèces végétales sur chaque points d'échantillonnage.....	p.18
Figure 19. . Matrice de dissimilarité de Bray-Curtis calculée sur valeurs d'abondances relatives des espèces végétales sur chaque points d'échantillonnage.....	p.19
Figure 20. Carte de répartition des 15 espèces végétales majoritaires sur les points d'échantillonnage de la zone de mesure, superposé à un relevé topographique de terrain LIDAR d'une précision de 1 mètre.....	p.20
Figure 21. Suivi de la dynamique de fonte du couvert neigeux sur l'année 2022 avec les données Neige du pôle Théia du CNES sur la zone de mesure (B) et sur une zone large englobant le col du Lautaret et alentours (C). La dynamique de fonte a également été observée sur l'année 2020 sur la zone de mesure avec les données Sentinel – 2 grâce au logiciel ArgcIs (A).....	p.21
Figure 22. Variabilités interannuelles de différents indicateurs de la dynamique de fonte du couvert neigeux sur la zone de mesure entre les années 2015 à 2022.....	p.21
Figure 23. Carte des indices hyperspectraux de végétations Normalized Vegetation Index (A) et Enhanced Vegetation Index (B) sur la zone de mesure.....	p.22
Figure 24. Carte de l'indice hyperspectral de végétation Enhanced Vegetation Index (A) et représentation spatiale de la mise en classe en 8 clusters de cet indice EVI (B) sur la zone de mesure.....	p.22
Figure 25. Carte de deux indices hyperspectraux de végétations indicateurs du taux d'humidité relative dans le couvert végétal de la zone de mesure : Normalized Difference Moisture Index (A) et Moisture Stress Index (B).....	p.24
Figure 26. Carte de répartition des principaux couverts végétaux et zones d'intérêts de la zone de mesure.....	p.25

Liste des sigles et abréviations

°C jour : mesure empirique utilisée pour calculer l'accumulation de chaleur sur une période donnée.

Indice de Shannon-Weaver : permet d'exprimer la diversité spécifique (nombre d'espèces) d'un peuplement étudié. Il se calcule avec la formule suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^S pi \cdot \log_2(pi)$$

pi = l'abondance proportionnelle d'une espèce présente (pi = ni/N).
 ni = le nombre d'individus dénombrés pour une espèce présente.
 N = le nombre total d'individus dénombrés, toute espèce confondue.
 S = le nombre total de la liste d'espèces présentes.

Indice d'équitabilité de Pielou (E) : E = H'/Hmax. L'indice E permet d'évaluer le poids de chaque espèce dans l'occupation de l'espace et varie entre 0 et 1. Il tend vers 1 (maximal) quand les espèces ont des abondances identiques dans le peuplement et vers 0 (minimal) lorsque la majorité de l'effectif correspond à une seule espèce.

Indice de dissimilarité de Bray-Curtis : permet d'évaluer la dissimilarité entre plusieurs échantillons donnés, en termes d'abondance de taxons présents dans chacun de ces échantillons. Il est compris entre 0 (les deux échantillons ont la même composition) et 1 (les échantillons sont totalement dissemblables).

ASC : Aire Sous la Courbe. Correspond au calcul de l'intégrale de la courbe sur une période de temps donné (ici, la période de croissance).

Liste des indices hyperspectraux de végétation et leurs équations (Roberts, Roth, Perroy 2011) :

Index	Equation	Reference
Structure (LAI, green biomass, fraction)		
*NDVI	$(R_{NIR}-R_{red})/(R_{NIR}+R_{red})$	Rouse et al. [15]
*SR	R_{NIR}/R_{red}	Jordan [3]
*EVI	$2.5 * (R_{NIR}-R_{red}) / (R_{NIR} + 6 * R_{red} + 7.5 * R_{blue} + 1)$	Huete et al. [23]
*NDWI	$(R_{657}-R_{1241}) / (R_{657} + R_{1241})$	Gao [29]
**WBI	R_{909}/R_{570}	Peñuelas et al. [28]
*ARVI	$(R_{NIR} * [R_{red} * \gamma + (R_{blue} - R_{red})]) / (R_{NIR} + [R_{red} * \gamma + (R_{blue} - R_{red})])$	Kaufman & Tanré [22]
*SAVI	$[(R_{NIR}-R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red} + L)] * (1+L)$	Huete [21]
**1DL_DGVI	$\sum_{\lambda_{425 \text{ nm}}}^{\lambda_{670 \text{ nm}}} R'(\lambda_i) - R'(\lambda_{625 \text{ nm}}) \Delta \lambda_i$	Elvidge & Chen [1]
**1DZ_DGVI	$\sum_{\lambda_{425 \text{ nm}}}^{\lambda_{670 \text{ nm}}} R'(\lambda_i) \Delta \lambda_i$	Elvidge & Chen [1]
*VARI	$(R_{750}-R_{red}) / (R_{750} + R_{red} - R_{blue})$	Gitelson et al. [13]
*VGreen	$(R_{670}-R_{red}) / (R_{670} + R_{red})$	Gitelson et al. [13]
Biochemical		
Pigments		
**SIPI	$(R_{800}-R_{445}) / (R_{800}-R_{680})$	Peñuelas et al. [31]
**PSSR	$(R_{670}/R_{675}) / (R_{670}/R_{690})$	Blackburn [30]
**PSND	$[(R_{810}-R_{675}) / (R_{680} + R_{715})] / [(R_{435}-R_{650}) / (R_{620} + R_{630})]$	Blackburn [32]
**PSRI	$(R_{680}-R_{550}) / R_{750}$	Merzlyak et al. [33]
Chlorophyll		
**CARI	$[(R_{730}-R_{670}) - 0.2 * (R_{730}-R_{670})]$	Kim [34]
**MCARI	$[(R_{730}-R_{670}) - 0.2 * (R_{730}-R_{670})] * (R_{730}/R_{670})$	Daughtry et al. [35]
**CI _{red edge}	$R_{NIR} / R_{red edge} - 1$	Gitelson et al. [36]
Anthocyanins		
**ARI	$(1/R_{670}) - (1/R_{red edge})$	Gitelson et al. [40]
**mARI	$\{[(1/R_{670}) - (1/R_{red edge})] * R_{NIR}\}$	Gitelson et al. [36]
**RGRI	R_{red} / R_{green}	Gamon & Surfus [7]
**ACI	R_{670} / R_{NIR}	Van den Berg & Perkins [41]
Carotenoids		
**CRI1	$(1/R_{510}) - (1/R_{550})$	Gitelson et al. [42]
**CRI2	$(1/R_{510}) - (1/R_{710})$	Gitelson et al. [42]
Water		
*NDII	$(R_{NIR}-R_{SWIR}) / (R_{NIR}+R_{SWIR})$	Hunt & Rock [12]
*NDWI, **WBI	See Above	See Above
*MSI	R_{SWIR} / R_{NIR}	Rock et al. [43]
Lignin & Cellulose/Residues		
**CAI	$100 * [0.5 * (R_{2031} + R_{2211}) - R_{2101}]$	Daughtry [47]
**NDLI	$[\log(1/R_{1754}) - \log(1/R_{1660})] / [\log(1/R_{1754}) + \log(1/R_{1660})]$	Serrano et al. [48]
Nitrogen		
**NDNI	$[\log(1/R_{1510}) - \log(1/R_{1660})] / [\log(1/R_{1510}) + \log(1/R_{1660})]$	Serrano et al. [48]
Physiology		
Light Use Efficiency		
**RGRI, **SIPI	See Above	See Above
**PRI	$(R_{530}-R_{570}) / (R_{530} + R_{570})$	Gamon et al. [9]
Stress		
*MSI	See Above	See Above
**REP	l(max first derivative: 680-750 nm)	Horler et al. [10]
**RVI	$[(R_{714} + R_{752}) / 2 - R_{713}]$	Merton & Huntington [52]

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Summary.....	iii
Table des illustrations	iv
Liste des sigles et abréviations.....	v
Introduction	1
1. Contexte institutionnel.....	2
1.1. Le programme ICOS :	2
1.2. Le Jardin du Lautaret :	2
1.3. L'institut des Géosciences de l'Environnement :	3
2. Contexte expérimental : présentation du site et des axes de l'étude.....	3
2.1. Le site d'étude : détermination de la zone de mesure :	3
2.2. Détermination et mise en place de la stratégie d'échantillonnage :	4
2.3. Les variables mesurées : lesquelles choisir pour caractériser notre écosystème ?.....	4
2.3.1. Normalized Vegetation Index (NDVI) :	5
2.3.2. Above Ground Biomass (AGB) :	5
2.3.3. Leaf Area Index (LAI) :	5
2.3.4. Diversité botanique et indices de biodiversité :	6
2.4. Utilisation de la télédétection pour la caractérisation de notre écosystème : principe et utilisation :	6
2.4.1. Suivi des dynamiques d'évolution du NDVI sur les deux dernières décennies avec les données satellitaires MODIS :	6
2.4.2. Suivi des dynamiques spatiales d'évolution du NDVI au cours de la saison de croissance sur les cinq dernières années avec les données satellitaires Sentinel – 2 :	7
2.4.3. Dynamique de fonte du couvert neigeux :	7
2.4.4. Indices Hyperspectraux de Végétation (HVI) :	8
2.5. Principe et utilisation des méthodes de regroupements et classification ascendante hiérarchique :	9
2.5.1. Méthodes de clustering non supervisé :	9
2.5.2. Méthode de clustering hiérarchique : la classification ascendante hiérarchique (CAH) :	10
3. Résultats : quelles sont les caractéristiques de l'écosystème de la zone de mesure ?.....	10
3.1. Indice NDVI : dynamique d'évolution spatio-temporelle et tendances sur les deux dernières décennies :	10
3.1.1. Etude de la dynamique d'évolution spatiale de la valeur de l'indice NDVI au cours de la saison de croissance avec les données satellitaires Sentinel – 2	10
3.1.2. Etude des tendances d'évolution de la valeur du NDVI au cours de la saison de croissance sur la période 2000 – 2022 avec les données satellitaires MODIS :	14
3.2. Etude de la composition du couvert végétal : calculs d'indicateurs de biodiversité et délimitation spatiale de zones à couvert végétal particuliers :	15
3.3. Observation des dynamiques spatio-temporelle de fonte du couvert neigeux sur la période 2014 – 2023 :	20
3.4. Analyse du relevé hyperspectral de terrain : calculs et interprétation d'indices hyperspectraux de végétation :	21
3.4.1. Structural :	21
3.4.2. Biochimique :	23
3.4.3. Physiologique :	24
3.5. Croisement des données et création d'une carte de répartition des principaux couverts végétaux :	24
4. Discussion	26
5. Conclusion.....	27
Bibliographie	28
Annexes	29

Introduction

Dans le cadre du programme européen ICOS (Integrated Carbon Observation System) de mesure et suivi des flux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, une tour de mesure de flux atmosphériques a été installée à proximité du jardin du Lautaret. Ce programme s'inscrit dans un objectif de meilleure compréhension et caractérisation des cycles de carbone, et notamment du rôle complexe joué par chaque écosystème dans ces cycles.

Les échanges de carbone atmosphérique enregistrés au niveau de la tour de mesure sont majoritairement le produit de processus se déroulant dans l'écosystème proche, et notamment le développement et la croissance du couvert végétal. De fait, pour pouvoir être en mesure d'analyser les échanges gazeux enregistrés sur la tour de mesure, il est nécessaire de comprendre et caractériser les dynamiques de fonctionnement de l'écosystème environnant la tour. Caractériser le fonctionnement d'un écosystème complet est extrêmement complexe, c'est pourquoi nous avons fait le choix de nous concentrer sur les dynamiques de fonctionnement du couvert végétal autour de la tour de mesure.

De nombreux outils et techniques existent pour essayer de caractériser le fonctionnement d'un couvert végétal, et notamment des indices de croissance de la végétation, outils puissants permettant d'évaluer la santé, le stade de croissance ou les dynamiques de développement de la végétation. Dans cette étude, nous avons utilisé des indices de végétation largement reconnus en biologie et en agronomie, notamment l'indice Normalized Vegetation Index (NDVI), Above Ground Biomass (AGB) et Leaf Area Index (LAI), qui nous ont permis de suivre et comparer le développement de la végétation sur l'ensemble de la zone de mesure, au cours de la saison de croissance végétative.

Ces indices ont été collectés directement sur le terrain, via des protocoles standardisés inspirés du programme ICOS, mais également calculés à l'aide d'images satellitaires de type Sentinel – 2, Landsat et MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), ainsi qu'un relevé hyperspectral de la zone, offrant des possibilités d'analyses beaucoup plus larges. Les données satellitaires, largement utilisées dans différents domaines de recherche, permettent d'analyser les évolutions d'une grande variété d'indices de végétation à des échelles spatiales très fines (résolution de 10 mètres pour les satellites Sentinel – 2A et 2B) et temporelles très larges (premières images fournies par le satellite Landsat en 1984).

Pour compléter l'analyse des indices de végétation, il a été nécessaire de les associer à des recensements floristiques permettant de faire le lien entre la composition du couvert végétal et les relevés spectraux observés. En effet, chaque espèce ou groupe d'espèces a ses propres caractéristiques écologiques, ceci ayant une influence sur la réponse spectrale aux différentes longueurs d'ondes ciblées.

En analysant les variables pouvant affecter le développement de la végétation, comme la durée d'enneigement et les dynamiques de fonte de neige, la microtopographie, les conditions météorologiques, etc., nous avons cherché à repérer, délimiter et caractériser les différents couverts végétaux et leurs espèces dominantes sur la zone de mesure. L'objectif de l'étude a été de répondre aux questions suivantes : comment évolue de manière spatio-temporelle le NDVI au cours de la saison de croissance, et quels sont les facteurs qui influencent cette dynamique? observe-t-on une modification de cette dynamique d'évolution sur les 20 dernières années ? comment caractériser le couvert végétal sur la zone de mesure, et quels sont les facteurs influant sur sa composition et sa répartition ?

1. Contexte institutionnel

1.1. Le programme ICOS :

ICOS est une infrastructure de recherche (une installation fournissant des ressources et des services aux communautés scientifiques), fondée en 2008, dont le siège se situe à Helsinki, en Finlande. Son objectif est d'observer les flux des gaz à effet de serre en Europe et dans les régions adjacentes. Elle est constituée de réseaux organisés de mesure du cycle du gaz à effet de serre dans l'atmosphère, les continents et les océans. ICOS est spécifiquement dédiée à la mesure des flux et des concentrations en dioxyde de carbone, méthane et oxyde nitreux, de 2016 à 2035 (<https://icos-france.fr/>).

Objectif du programme ICOS :

Le but du programme ICOS est de construire un réseau standardisé, sur le long-terme, à haute précision, pour mesurer les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre. L'observatoire intègre 3 composantes implantées dans des écosystèmes différents : ICOS Atmosphère, ICOS Ecosystème, ICOS Océan.

L'enjeu est de parvenir à comprendre les processus qui se cachent derrière les échanges des gaz à effet de serre entre végétation, océan et atmosphère, et de mesurer les effets des émissions liées aux activités humaines. Par ailleurs, le suivi attentif des variations des flux atmosphériques de carbone selon les aléas d'origines climatiques ou anthropiques fait partie des missions principales du programme ICOS.

Enfin, cette mise en commun et cette standardisation des données doit permettre d'améliorer significativement la visibilité et l'accessibilité de ces données pour les chercheurs, les communautés scientifiques et les décideurs.

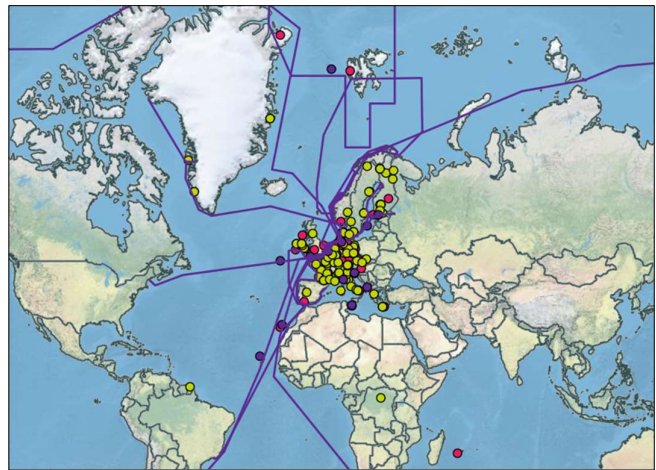


Figure 1. Répartition des stations membres du réseau ICOS dans le monde (<https://www.icos-cp.eu/>)

Les réseaux Atmosphères et Ecosystèmes comprennent deux types de stations : les stations de classe 1, équipées pour mesurer la totalité des variables ICOS, et les stations de classe 2, équipées pour mesurer une partie des variables ICOS. Par ailleurs, il existe une troisième catégorie, les stations associées, qui font partie du programme ICOS mais dont les exigences en terme de respect des protocoles ou de la fréquence des prises de mesures sont moindres en comparaison des stations de classes 1 et 2.

Le site sur lequel s'est déroulé la partie expérimentale de ce stage, le Jardin du Lautaret, a très récemment intégré le programme ICOS Ecosystème, en tant que station de classe associée.

1.2. Le Jardin du Lautaret :

A la fin du 19^{ème} siècle, l'Europe voit fleurir des dizaines de jardins botaniques dans les Alpes. Le jardin du Lautaret, créé en 1899 par Jean-Paul Lachmann, professeur de botanique à l'Université de Grenoble, s'inscrit alors dans cette dynamique particulière.

L'emplacement est choisi en sa qualité de carrefour géologique et bioclimatique, mais aussi routier, à la limite des Alpes du Nord et des Alpes du Sud, à la biodiversité extrêmement riche.

Le jardin du Lautaret est aujourd'hui un jardin botanique alpin de référence, accueillant plus de 20 000 visiteurs par an, et une station d'accueil pour les chercheurs du monde entier, sous la tutelle de l'Université Grenoble Alpes et du CNRS, et membre de la fédération de l'observatoire des sciences de l'univers de Grenoble (OSUG). (<https://www.jardindulautaret.com/jardin-botanique/histoire-du-jardin-1013861.kjsp?RH=1632747086315>)

Le jardin est impliqué dans des réseaux locaux, nationaux et internationaux de recherche : Zone atelier Alpes (RZA), réseau national de station d'écologie expérimentales (RÉNSEE), analysis and experimentation on ecosystems (AnaEE), european long term for socio-ecological research (eLTER) et integrated carbon observation system (ICOS).

L'équipe du jardin apporte un soutien technique, matériel, humain et scientifique aux chercheurs ayant des projets de recherche dans la zone.

Par ailleurs, dans le cadre de ses activités de soutien à la recherche, le jardin du Lautaret est impliqué dans la production et la mise à disposition de données scientifiques, sur un vaste territoire de 300 km² autour du Lautaret – Galibier. Dans cette zone, plusieurs stations de mesures et de nombreux capteurs permettent de récolter en continu de nombreuses et précieuses informations sur les dynamiques des écosystèmes dans lesquels ils sont implantés.

1.3. L'institut des Géosciences de l'Environnement :

L'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) est un laboratoire public de recherche en Sciences de la Planète et de l'Environnement, né au 1er janvier 2017 de la fusion des unités de recherche LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement) et LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement). En 2023, l'unité de recherche ETNA (Erosion Torrentielle Neige et Avalanche) rejoint l'IGE pour former une unité mixte de recherche dont les tutelles sont le CNRS/INSU, l'IRD, l'Université Grenoble Alpes (UGA), INRAE et Grenoble-INP au sein de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble.

L'IGE mène ses recherches sur le **climat, l'anthropisation de notre planète et les risques environnementaux** en combinant glaciologie, hydrologie, océanographie, mécanique, sciences atmosphériques et environnementales, sciences inter et transdisciplinaires menées avec les SHS et/ou les acteurs socio-économiques.

L'effectif moyen du laboratoire est d'environ 330 personnes, dont 190 membres permanents (chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens et personnels administratifs) et environ 140 doctorants, post-doctorants et personnels en contrat à durée déterminée. Le laboratoire accueille chaque année une centaine de stagiaires et visiteurs scientifiques. L'IGE est hébergé dans quatre bâtiments situés sur le campus universitaire de Grenoble (bâtiment Glaciologie, OSUG-B, Maison Climat Planète et INRAE-Grenoble Saint Martin d'Hères). (<https://www.ige-grenoble.fr/-L-IGE-en-quelques-mots->)

L'IGE est organisé en 9 équipes de recherche et trois services support.

2. Contexte expérimental : présentation du site et des axes de l'étude

2.1. Le site d'étude : détermination de la zone de mesure :

La tour de mesure de flux atmosphérique a été installée au col du Lautaret, sur une prairie d'une vingtaine d'hectares à la topographie assez plane, à l'extrémité de la vallée de la Guisane.

Comme expliqué dans l'introduction, les échanges gazeux mesurés au niveau de la tour de mesure sont majoritairement expliqués par l'activité des micro-organismes et des plantes dans l'environnement proche. De fait, il a été nécessaire dans le cadre de notre étude de délimiter une zone depuis laquelle provient un pourcentage minimum des flux d'échanges verticaux de dioxyde de carbone (CO₂) mesurés au niveau de la tour.

Nous avons calculé, à partir de variables météorologiques mesurées au niveau de la tour (vitesse et direction du vent, et leur fluctuations turbulentes), une probabilité de provenance géographique des zones qui contribuent au flux d'échange de CO₂ mesuré. Pour exemple, le fetch90 représente la limite externe de la zone dont provient 90% des flux d'échange mesurés.

Nous avons obtenu différentes aires d'origine (figure 2-A), en fonction du pourcentage de flux d'échange de CO₂ mesuré par la tour ICOS dont l'origine se situe dans l'aire en question, ainsi que la répartition de l'origine de ces flux au sein de cette aire.

Nous avons sélectionné pour notre étude le « fetch90 » (figure 2-B). Nous appellerons cette aire géographique la « zone de mesure » tout au long de notre étude.

2.2. Détermination et mise en place de la stratégie d'échantillonnage :

Le programme ICOS, sur lequel se base notre étude, s'appuie sur une stratégie d'échantillonnage rigoureuse et exigeante, dont les deux principes fondamentaux sont d'optimiser la répartition spatiale des points sur la zone de mesure, et de conserver ces points au cours de l'année, et d'une année sur l'autre (Papale, D., & Nicolini, G. (2016)).

Nous appuyant sur ces principes, nous avons déterminé 20 points d'échantillonnage, selon une stratégie permettant d'optimiser au maximum leur répartition.

En utilisant la zone de mesure préalablement choisie (« fetch90 »), nous avons établi un pavage hexagonal recouvrant toute la zone (figure 2-B). En parallèle de ce pavage, 150 points ont été tirés au sort aléatoirement. En

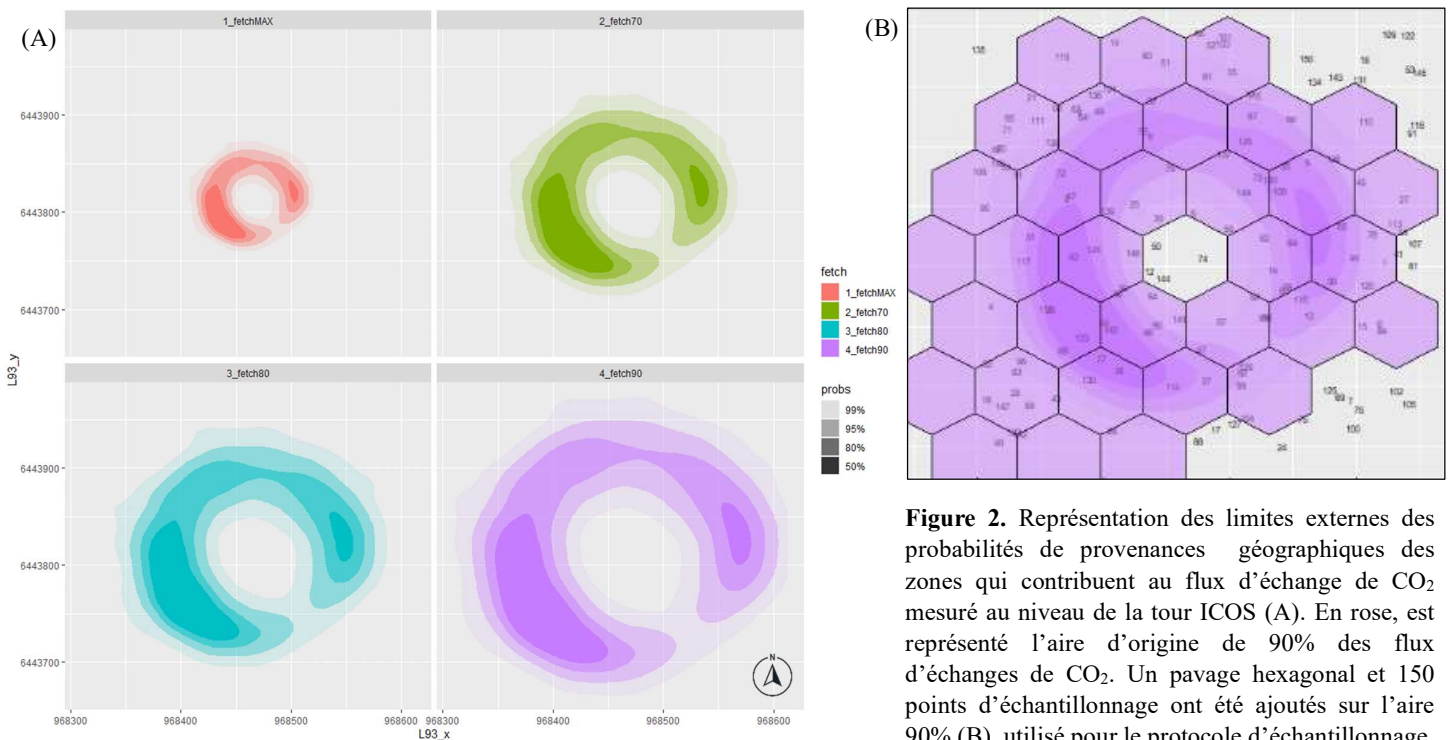


Figure 2. Représentation des limites externes des probabilités de provenances géographiques des zones qui contribuent au flux d'échange de CO₂ mesuré au niveau de la tour ICOS (A). En rose, est représenté l'aire d'origine de 90% des flux d'échanges de CO₂. Un pavage hexagonal et 150 points d'échantillonnage ont été ajoutés sur l'aire 90% (B), utilisé pour le protocole d'échantillonnage.

superposant le pavage et les points, nous avons choisi aléatoirement

1 point par pavé. Sur les points restants, 20 ont été tirés au sort aléatoirement, en prenant garde de supprimer ceux situés en bordure ou en dehors de la zone de mesure, et en priorisant ceux situés dans les zones de probabilité d'origine les plus élevées. La répartition des 20 points d'échantillonnage finalement obtenus est montrée en figure 26.

2.3. Les variables mesurées : lesquelles choisir pour caractériser notre écosystème ?

La caractérisation d'un écosystème, même en se limitant à la partie végétale, est un travail colossal, extrêmement complexe et multifactoriel. Pour simplifier le travail, il existe de nombreux indices environnementaux permettant de regrouper et résumer tout ou partie de l'information contenue dans différentes variables environnementales, ceci permettant de rendre l'information plus lisible et comparable, au sein d'un même site et entre différents sites.

En nous appuyant sur le protocole ICOS (Op de Beeck, M., Sabbatini, S., & Papale, D. (2017)), nous avons établi une liste de variables environnementales d'intérêts, adaptées à notre environnement et à nos moyens. A chaque point d'échantillonnage, toutes les variables ont été mesurées sur la même zone (excepté l'indice AGB, la mesure étant destructive), soit un quadrat de 1m x 1m, orienté au nord-ouest et ayant pour coin inférieur gauche le point d'échantillonnage.

2.3.1. Normalized Vegetation Index (NDVI) :

Le NDVI, Normalized Vegetation Index, est un indice sans dimension qui permet d'estimer la densité et la santé du couvert végétal. Il est calculé en mesurant la différence de réflectance entre le proche-infrarouge (que les plantes réfléchissent fortement) et la lumière rouge (que les plantes absorbent). Variant entre -1 et 1, le suivi de son évolution au cours d'une saison de croissance de la végétation donne de nombreuses indications sur les dynamiques de fonctionnement de cet écosystème.

Nous avons analysé l'évolution du NDVI sur la zone de mesure à travers différentes méthodes, permettant d'observer les évolutions temporelles de la valeur moyenne globale du NDVI au fil des années, et les dynamiques d'évolutions spatiales de la valeur du NDVI au cours d'une saison et entre les saisons.

Par ailleurs, nous avons également testé de manière expérimentale l'influence de différents paramètres sur nos mesures : luminosité, orientation du soleil, couverture nuageuse. Les résultats sont montrés en annexe 7.

2.3.1.1. Suivi expérimental de l'évolution du NDVI sur la saison 2023 :

L'objectif de l'expérimentation est de réaliser un suivi constant et régulier du NDVI sur les points d'échantillonnage dans le but de suivre et caractériser le développement végétatif de la zone de mesure au cours de la saison de croissance 2023. Les données ainsi récoltées ont été mises en relation avec le même indice NDVI calculé en un seul point et à intervalles de temps réguliers par la tour de mesure de flux ICOS. Par ailleurs, l'indice NDVI ainsi mesuré peut permettre d'établir des relations de corrélation avec l'indice Leaf Area Index (LAI) et Above Ground Biomass (AGB).

Equipé d'un dispositif expérimental fabriqué par nos soins, composé d'une canne portative de 3 mètres de hauteur, de deux capteurs de réflectance spectrale de type Decagon-SRS (Spectral Reflectance Sensors) et d'un datalogger Campbell CR1000, nous avons mesuré l'indice NDVI sur les 20 points d'échantillonnage de la zone de mesure, à un intervalle régulier de 10 jours environ, de début juin à fin août 2023. L'angle de vue des capteurs SRS est de 10°, ce qui correspond à un diamètre de prise de vue au sol d'environ 50cm avec la hauteur de canne de 3 mètres.

2.3.2. Above Ground Biomass (AGB) :

L'indice AGB représente la végétation, vivante ou non, au-dessus du sol, autrement dit la biomasse aérienne végétale (tige, tronc, branches, écorce, graines, feuilles, ...). Il est défini comme la masse de matière vivante ou morte des formes de vie des arbres ou des arbustes (ligneux), exprimée en masse par unité de surface, généralement en tonnes / ha.

L'objectif de l'expérimentation est de déterminer la biomasse aérienne végétale sur les 20 points d'échantillonnage. En comparant le poids mesuré de la biomasse sèche et de la biomasse humide, différents indicateurs concernant la teneur en eau des plantes peuvent être calculés.

Toute la végétation aérienne, sur un quadrat de 1m x 1m, est prélevée puis pesée immédiatement. Les échantillons sont ensuite mis à l'étuve pour être séchés, puis repesés pour déterminer le poids sec. Cette mesure, très destructive, n'a été réalisée qu'une seule fois au cours de la saison, au pic de croissance de la végétation.

2.3.3. Leaf Area Index (LAI) :

L'indice de surface foliaire quantifie la quantité de feuilles dans un couvert végétal. Par définition, il s'agit du ratio de la surface foliaire par unité de surface au sol. L'indice de surface foliaire n'a pas d'unité car il s'agit d'un rapport de surfaces. Il peut varier de moins de 1 dans les écosystèmes désertiques, à 9 dans les forêts tropicales (Fang et al. 2019).

L'importance du LAI est directement liée au rôle des feuilles pour les plantes. Celles-ci, interfaces majoritaires de la plante avec l'atmosphère, jouent un rôle primordial dans les échanges gazeux plante-atmosphère, le fonctionnement de la photosynthèse, le port physique de la plante ou encore l'absorption et le transport de l'eau.

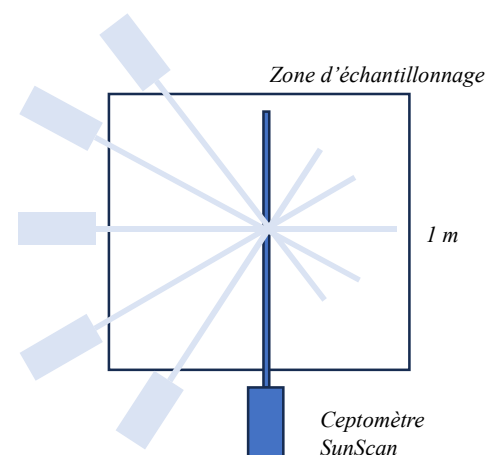


Figure 3. Schéma d'organisation du protocole de mesure de l'indice LAI. En bleu foncé, la première mesure, les mesures suivantes sont représentées en bleu clair.

Enfin, le LAI est un indicateur fiable du développement de la plante (Trimble 2020, Fang et al. 2019).

La méthode choisie pour mesurer l'indice LAI a été la méthode non-destructive, par l'utilisation d'un ceptomètre SunScan, équipé d'une sonde SS1 et d'un capteur de rayonnement solaire externe de type BF5. Sur chaque point d'échantillonnage, 6 mesures ont été effectuées, suivant une rotation de 30° entre chaque prise (figure 3).

De la même manière que l'indice AGB, la mesure du LAI n'a été effectuée qu'une seule fois au cours de la saison, au pic de croissance de la végétation.

2.3.4. Diversité botanique et indices de biodiversité :

Pour compléter l'analyse des indices de végétation présentés ci-dessus, il a été nécessaire de définir la composition et la diversité des espèces composant le couvert végétal sur chacun des 20 points d'échantillonnage, chaque indice étant directement relié aux caractéristiques physiologiques des espèces végétales concernées.

Pour ceci, nous avons effectué un relevé floristique, sur un quadrat de 1m x 1m, le même que celui utilisé pour les autres indices (excepté l'indice AGB). La totalité des espèces présentes ont été répertoriées, ainsi que leurs abondances relatives au sein du quadrat.

A partir de ces relevés, différents indices de biodiversité ont été calculés, tels que l'indice de Shannon, l'indice d'équitabilité de Pielou et l'indice de Dissimilarité de Bray-Curtis, et les similarités entre les points d'échantillonnage ont été évaluées, notamment grâce à des méthodes de clustering et de classifications ascendantes hiérarchiques.

2.4. Utilisation de la télédétection pour la caractérisation de notre écosystème : principe et utilisation :

La télédétection consiste à « mesurer le rayonnement émis, diffusé, ou réfléchi par un milieu pour en déduire les propriétés de ce milieu » (d'après Principes de la télédétection, application à l'observation de la Terre et son climat, 2023). En permanence, des milliers de satellites survolent la Terre, et observent, mesurent et enregistrent une grande diversité de données, dans les océans, l'atmosphère et les surfaces continentales. Plusieurs des variables que nous avons choisi d'analyser dans cette étude peuvent être traitées par télédétection, notamment l'indice NDVI, dont le calcul est simple et les possibilités d'utilisation très larges.

De nombreuses données satellitaires sont rendues libres d'accès par les principales agences spatiales et météorologiques dans le monde (Agence Spatiale Européenne (ESA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), ...), et sont relativement faciles à extraire et utiliser. En fonction des différentes variables de notre étude, nous avons choisi d'utiliser les données proposées par les satellites Sentinel – 2 (temps de revisite : 5 jours, résolution : 10 mètres), MODIS (temps de revisite : 2 jours, résolution : 250 mètres) et Landsat (temps de revisite : 16 jours, résolution : 30 mètres).

Les images satellitaires que nous avons exploitées sont qualifiées de « multispectrales », mais nous avons également exploité un relevé « hyperspectral » de la zone du col du Lautaret, effectué en août 2008 par des scientifiques du Laboratoire d'Ecologie Alpine de Grenoble (LECA), d'une résolution de 80 centimètres seulement.

2.4.1. Suivi des dynamiques d'évolution du NDVI sur les deux dernières décennies avec les données satellitaires MODIS :

Nous nous sommes intéressés aux dynamiques d'évolution du NDVI sur la zone de mesure au cours de la saison de croissance sur la période 2000 – 2022. En utilisant les données NDVI produites par le satellite MODIS, les tendances d'évolution du NDVI ont été observées, ainsi que plusieurs autres paramètres tels que la durée de croissance, la date de fonte des neiges ou la date de pic de croissance. En utilisant ces différentes variables, les décennies 2000 – 2010 et 2011 – 2022 ont été analysées et comparées selon l'évolution saisonnière de la valeur moyenne du NDVI sur la décennie, pour détecter d'éventuelles tendances d'évolution.

- **Méthode :**

Toutes les données satellitaires couvrent une période allant du 1^{er} avril au 31 octobre, sur la période 2000 – 2022. Les données MODIS (MOD09Q1_NDVI_), d'une résolution spatiale de 250 mètres, assurent un survol de la zone tous les 8 jours.

Les images satellitaires ont été extraites depuis le site de la NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) grâce au package R *MODISsp*.

La résolution des pixels étant très large en comparaison à l'aire de notre zone (420m x 450m), nous avons dû nous assurer avant toute analyse de sélectionner les bons pixels correspondant à notre zone d'étude, et de comparer les valeurs du NDVI sur ces pixels à des valeurs plus précises (Sentinel – 2), afin de s'assurer de la fiabilité des données.

2.4.2. Suivi des dynamiques spatiales d'évolution du NDVI au cours de la saison de croissance sur les cinq dernières années avec les données satellitaires Sentinel – 2 :

Nous avons également étudié les dynamiques d'évolutions spatiales du NDVI sur la zone de mesure au cours de la saison de croissance, en s'appuyant sur les données des satellites Sentinel – 2A et Sentinel – 2B.

Les données Sentinel, d'une résolution spatiale de 10 mètres, offrent la possibilité d'étudier l'évolution du NDVI sur notre zone de manière plus fine, en la considérant non plus comme un patch homogène et régulier, ce qui a été le cas avec le satellite MODIS, mais comme un environnement complexe composé de différentes dynamiques d'évolutions spatiales.

- **Méthode :**

Toutes les données satellitaires couvrent une période allant du 1^{er} avril au 31 octobre, sur les années 2018 à 2022. Les données Sentinel – 2A (S2A_MSIL2A) et Sentinel – 2B (S2B_MSIL2A), d'une résolution spatiale de 10 mètres, et d'une résolution temporelle de 10 jours chacune, assurant une fréquence combinée de survol de la zone de 5 jours, ont été téléchargées depuis le Copernicus Open Acces Hub, en utilisant le package R *sen2r*.

Les deux types de données téléchargées sont le NDVI (Normalized Vegetation Index) et BOA (Bottom Of the Atmosphere). L'indice NDVI est calculé en utilisant les bandes rouges et infrarouges, tandis que BOA est une combinaison des 11 bandes spectrales enregistrées dans le domaine visible (*Sentinel 2 Bands and Combinations - GIS Geography*).

Nous avons analysé les données NDVI dans notre étude, et les données BOA ont servi à effectuer un contrôle visuel sur chaque images téléchargées pour éliminer celles inexploitable (présence de nuages ou ombres de nuages).

N.B : Nous avons par ailleurs testé l'homogénéité de l'indice NDVI récoltés via les données Sentinel – 2 sur la zone de mesure, sur des rayons de 5 mètres et 10 mètres autour des points d'échantillonnage. Les protocoles et résultats sont schématisés en annexe 2 et 3.

2.4.3. Dynamique de fonte du couvert neigeux :

L'écosystème du col du Lautaret, de type alpin, est fortement lié à la durée et la quantité de l'enneigement au cours de l'hiver. De fait, il nous a paru essentiel de nous pencher sur les dynamiques de fontes du couvert neigeux sur la zone de mesure, et les liens entretenus avec les autres paramètres étudiés dans cette étude.

Les dynamiques de fonte du couvert neigeux sur la zone de mesure ont été analysées sur les années 2014 à 2023, en utilisant le produit Neige généré par le pôle THEIA du Centre national d'études spatiales (CNES). Ces données sont produites à partir des images Sentinel-2 (20 m de résolution, tous les 5 jours ou moins) et Landsat-8 (30 m de résolution, tous les 16 jours) (Gascoïn et al. 2019).

L'utilisation de données Sentinel – 2 et Landsat – 8 permettent d'étudier avec une précision spatiale suffisante le processus de fonte sur notre zone, à l'inverse des données MODIS, dont la résolution de 250 mètres est trop large en comparaison de la surface de notre zone d'étude. En croisant les données Landsat et Sentinel, le pas de temps obtenu, 3 jours entre chaque image, permet de suivre avec précision la dynamique spatiale de fonte.

Les données obtenues ont été mises en relation avec un relevé topographique LIDAR de la zone de mesure, d'une précision de 1 mètre.

Ces deux variables, enneigement et topographie, étroitement corrélées, ont un rôle important sur la composition et la diversité du couvert végétal en surface. Etudier leur lien permet de mieux comprendre le fonctionnement de l'écosystème sur la zone de mesure.

- **Méthode :**

Nous avons utilisé deux méthodes pour extraire les données d'enneigement. Dans un premier temps, les images Sentinel – 2 ont été extraites sur une période de mars à mai, pour les années 2019 à 2023, sur lesquels nous avons réalisé un découpage manuel, date par date, de l'évolution du couvert neigeux sur la zone de mesure, grâce au logiciel de traitement géospatial Arcgis. Par ailleurs, nous avons également décidé d'utiliser les données Neige proposées par le pôle THEIA du CNES, qui nous ont permis d'accéder à un résultat équivalent.

Toutes les données Neige couvrent une période allant du 15 février au 15 juin, sur la période 2014 – 2023. Les satellites Sentinel – 2 et Landsat 8 combinés offrent un intervalle de revisite global moyen de moins de 3 jours (Gascoin et al. 2019).

Pour chaque année, nous avons étudié les dynamiques de fonte sur deux zones : une zone large, de 5 km x 3.5 km, ayant pour centre la zone de mesure et englobant tout le col du Lautaret, et une zone plus fine, de 600m x 500m, ne prenant en compte que la zone de mesure. Sur chacune de ces zones et à chaque date, la surface enneigée a été mesurée, en pourcentage de la surface totale, puis comparée entre les années. Les dynamiques spatiales de fonte au cours de la saison ont été comparées aux données topographiques à notre disposition (relevé LIDAR, précision : 1m), ainsi qu'aux relevés botaniques effectués sur la zone de mesure.

2.4.4. Indices Hyperspectraux de Végétation (HVI) :

Nous avons travaillé jusqu'ici avec des images « multispectrales », telles que celles offertes par les satellites MODIS et Sentinel – 2. La principale différence entre l'imagerie multispectrale et hyperspectrale réside dans le nombre de bandes et la largeur de ces bandes, l'imagerie multispectrale faisant généralement référence à des groupes d'une dizaine de bandes ou moins, tandis que l'imagerie hyperspectrale est constituée en général d'au moins 100 bandes, beaucoup plus étroites (10 – 20 nm). De fait, le niveau de détails est beaucoup plus important avec un capteur hyperspectral, permettant une analyse spatiale bien plus fine du couvert végétal et de ses caractéristiques.

- **Méthode :**

Les données hyperspectrales sur lesquelles nous avons effectué cette étude ont été obtenues lors d'un survol de la zone du col du Lautaret, en août 2008, et sont d'une résolution spatiale de 80 centimètres. Nous disposons donc d'une image capturée à une date précise, à l'inverse des données satellitaires MODIS et Sentinel – 2 qui couvrent une période de temps.

Cette étude s'intéresse donc à des comparaisons spatiales sur la zone de mesure, plutôt qu'à des évolutions temporelles comme ce fut le cas précédemment. De fait, la valeur absolue des indicateurs que nous avons calculée, si elle donne une bonne indication sur la valeur de l'indice, n'est pas l'élément principal qui nous a intéressé, faute de pouvoir analyser sa dynamique d'évolution temporelle et spatiale. Nous nous sommes plutôt penché sur les valeurs relatives des différentes zones observées selon les différents indicateurs étudiés.

L'analyse hyperspectrale est une discipline très complexe, et encore en plein développement. Les études scientifiques sur le sujet sont souvent propres à la zone d'étude et à ses caractéristiques environnementales et écologiques, et difficiles à extrapoler sur d'autres environnements (Lowe, Harrison, French 2017)(Roberts, Roth, Perroy 2011)(Sellami et al. 2022). Nous avons utilisé différents indices hyperspectraux de végétation (HVI), jugés robustes et fiables sur plusieurs écosystèmes. Néanmoins, pour une analyse hyperspectrale la plus fiable possible, il est souvent pertinent de calculer ses propres HVI, adaptés aux micro-variations de la végétation et aux caractéristiques propres à la zone d'étude.

Nous nous sommes intéressés à plusieurs HVI, classés en 3 catégories :

- **Structurale** : Normalized Vegetation Index (NDVI) ; Enhanced Vegetation Index (EVI).
- **Biochimique** :

Pigments : Pigment Specific Spectral Ratio (PSSR) ; Structurally Insensitive Pigment Index (SIPI) ; Plant Senescence Reflectance Index (PSRI).

Chlorophylle : Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI) ; Green Chlorophyll Index (GCI).

Anthocyanine : Anthocyanin Reflectance Index (ARI).

Caroténoïdes : Carotenoid Reflectance Index 2 (CRI2).

Lignine et cellulose : Cellulose Absorption Index (CAI) ; Normalized Difference Lignin Index (NDLI).

Eau : Normalized Difference Moisture Index (NDMI) ; Normalized Water Index (NDWI).

- **Physiologique** :

Stress : Red-edge Vegetation Stress Index (RVSI) ; Moisture Stress Index (MSI).

Efficacité d'utilisation de la lumière : Photochemical Reflectance Index (PRI).

2.5. Principe et utilisation des méthodes de regroupements et classification ascendante hiérarchique :

Le « clustering », ou méthode de regroupement en français, regroupe un ensemble de méthodes d'analyses des données qui vise à diviser un ensemble de données en différents groupes homogènes entre eux sur la base de caractéristiques communes. L'objectif d'un bon partitionnement est de :

- minimiser l'inertie intra-classe pour obtenir des groupes (ou clusters) les plus homogènes possibles, c'est-à-dire ayant des individus qui se ressemblent le plus possible selon la ou les caractéristiques choisies.
- maximiser l'inertie inter-classes, afin d'obtenir des sous-ensembles les plus différenciés possibles.

Nous avons utilisé dans cette étude deux méthodes de clustering « non supervisé » et une méthode de clustering « hiérarchique ».

2.5.1. Méthodes de clustering non supervisé :

Le clustering non supervisé est un processus qui permet de regrouper des données similaires. Le fait qu'il ne soit pas supervisé signifie que la machine va chercher par elle-même à regrouper les données selon les similarités qu'elles détectent, de manière plus ou moins autonome. Nous avons utilisé la méthode des K-means et la méthode PAM (Partitioning Around Medoids).

- **Classification K-means** :

La classification K-mean est une méthode itérative, qui converge vers une solution. Pour les premières itérations, on choisit un point de départ qui consiste à associer le centre des k classes, choisies de manière arbitraire ou non, à k objets pris au hasard. On calcule ensuite la distance entre les objets et les k centres et on affecte les objets aux centres dont ils sont le plus proches. Puis on affecte à nouveau les objets en fonction de leur distance aux nouveaux centres, et ainsi de suite jusqu'à ce que la convergence soit atteinte. Les noyaux des classes correspondent aux barycentres de ces classes.

- **Classification PAM** :

Cet algorithme permet de classer les données de façon plus robuste, en étant moins sensible aux valeurs aberrantes. Il fonctionne de manière similaire à l'algorithme des K-means, à la différence que le noyau d'une classe est ici un médoïd, c'est-à-dire l'observation d'une classe qui minimise la moyenne des distances aux autres

observations de la classe. A chaque itération, un médoïde est mis en concurrence avec un autre individu aléatoire, et, si l'échange améliore le critère, alors cet individu est le nouveau médoïde. Cet algorithme est cependant limité par le nombre d'observations et en temps de calcul, ce qui nous a empêché de l'utiliser sur certains jeux de données.

Nous avons utilisé la méthode de classification PAM avec le package R *cluster* à plusieurs reprises au cours de notre étude, notamment concernant les relevés floristiques d'abondances relatives, pour chercher à regrouper les points d'échantillonnage selon la composition du couvert végétal, et sur les données de NDVI collectées avec les images Sentinel – 2 sur ces points d'échantillonnage, dans l'objectif d'extraire des patrons spatiaux d'évolution du NDVI au cours de la saison. La classification K-means a été utilisée lorsque l'utilisation de PAM s'est révélée impossible, c'est-à-dire lorsque le jeu de données était trop important, par exemple lors de la mise n groupe des valeurs de NDVI extraites des images Sentinel – 2 sur l'ensemble des pixels de la zone de mesure sur la saison de croissance (plusieurs centaines de milliers de pixels).

2.5.2. Méthode de clustering hiérarchique : la classification ascendante hiérarchique (CAH) :

Complémentaire aux algorithmes de clustering non supervisé, le principe de la CAH est de rassembler les individus selon un critère de ressemblance qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances, exprimant la distance entre chaque individu pris deux à deux. Plus les observations sont semblables, plus la distance sera faible. La CAH va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme, ou arbre de classification, permettant, en découpant cet arbre à une hauteur choisie, de produire la partition désirée.

Nous avons utilisé la CAH en complément des méthodes de classification non supervisées citées ci-dessus. Elle nous a servi notamment lors de la classification des points d'échantillonnage selon les abondances des espèces végétales, et selon la valeur du NDVI extraites des images Sentinel – 2.

3. Résultats : quelles sont les caractéristiques de l'écosystème de la zone de mesure ?

3.1. Indice NDVI : dynamique d'évolution spatio-temporelle et tendances sur les deux dernières décennies :

3.1.1. Etude de la dynamique d'évolution spatiale de la valeur de l'indice NDVI au cours de la saison de croissance avec les données satellitaires Sentinel – 2

- **Comparaison des tendances au cours d'une année**

Les courbes d'évolutions du NDVI au cours de l'année nous permettent d'extraire deux phases principales (figure 4) : la phase de croissance, caractérisée par une augmentation homogène du NDVI sur tout les points

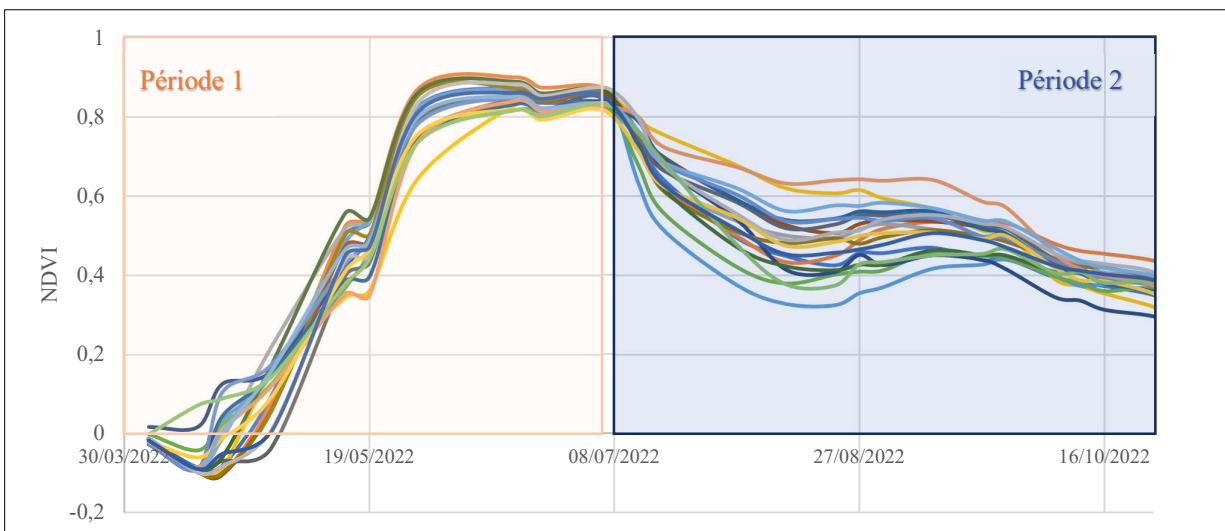


Figure 4. Evolution de la valeur de l'indice NDVI sur 19 points d'échantillonnage de la zone de mesure au cours de la période avril – octobre 2022 selon les données Sentinel – 2, et délimitation de la phase de croissance (période 1) et de la phase de sénescence (période 2). 10

d'échantillonnage, jusqu'au pic de végétation (période 1) ; phase de décroissance, qui diffère selon les années, et qui permet de distinguer des variations dans l'amplitude et la vitesse de diminution du NDVI selon les zones (période 2). Néanmoins, les tendances d'évolution restent les mêmes sur tout les points d'échantillonnage.

De fait, nous avons choisi de considérer les deux phases séparément, et de réaliser un clustering indépendant sur chacune d'entre elles.

Deux zones au cours de la phase de croissance :

On observe pour les 5 années d'études un optimum de 2 clusters sur la période 1 (figure 5-A). Les courbes d'évolution du NDVI sur les points d'échantillonnage ne permettent pas de distinguer de différences significatives sur les tendances d'évolution sur la phase de croissance, et la seule différence notable semble être la date de début de croissance/fin d'enneigement.

Cette hypothèse se confirme lorsque l'on compare le graphique du clustering du NDVI sur la période 1 et la dynamique de fonte sur la même année, où l'on observe une forte corrélation spatiale (figure 5).

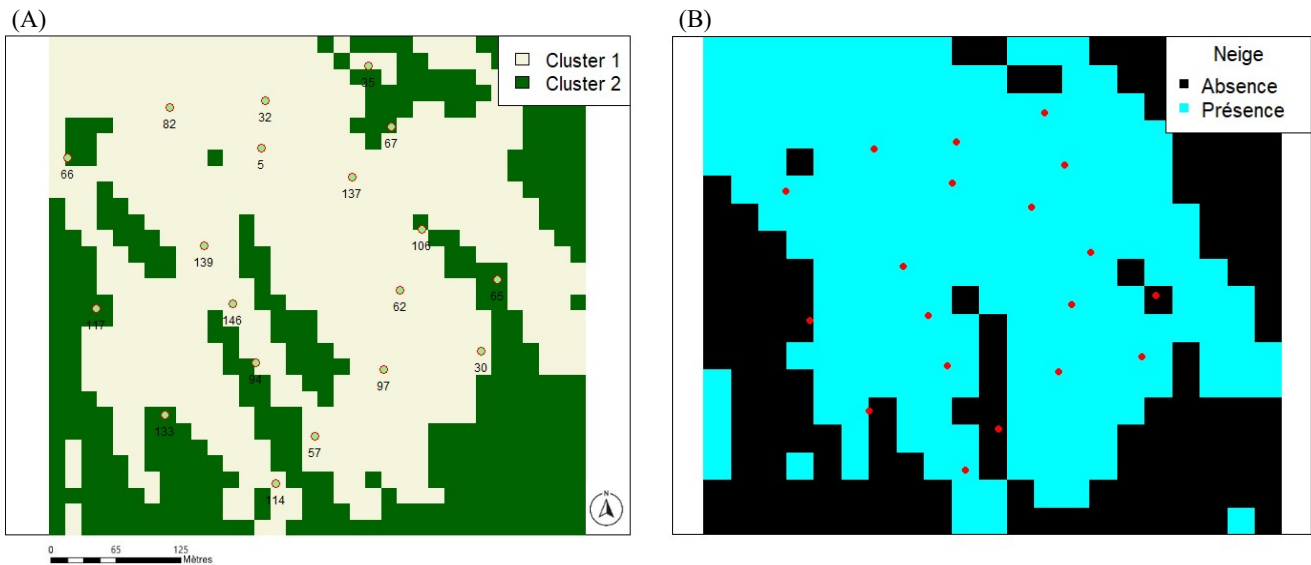


Figure 5. Carte de mise en classe en deux clusters de l'évolution du NDVI sur la période 1 sur l'année 2022 (A) et état du couvert neigeux au 19 avril 2022 (B). Les deux figures représentent strictement la même zone géographique, à la même échelle, et sont de fait superposables. Les données sont extraites des satellites Sentinel – 2 et Landsat – 8.

Plusieurs zones au cours de la phase de décroissance :

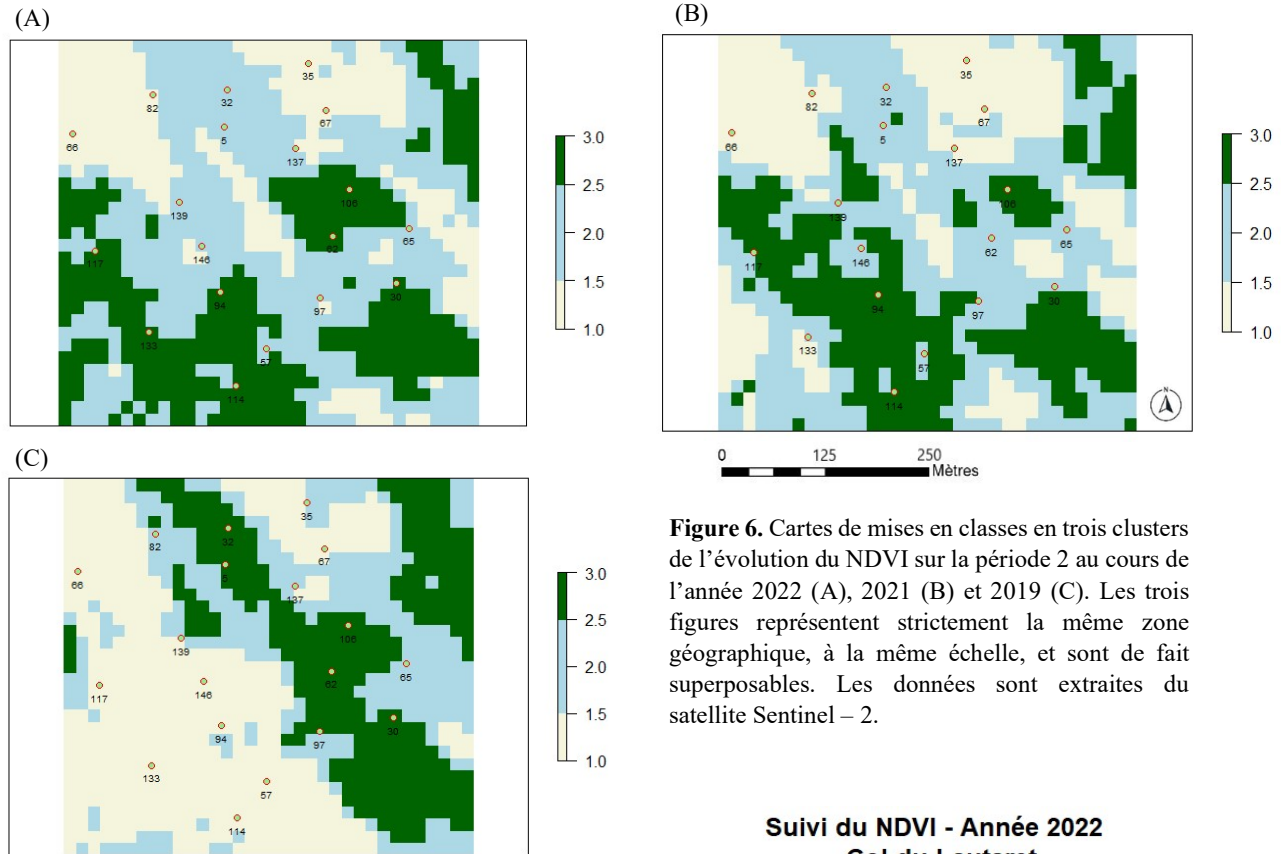
Le clustering sur la période 2 est beaucoup moins évident. Nous avons rencontré beaucoup de difficultés à trouver des tendances qui se répétaient selon les années.

Nous observons deux zones qui semblent se retrouver dans le même cluster sur les années d'études (figure 6, figure 7) : la zone humide, autour du point 67, et la zone autour du point 66. Lorsque l'on observe les graphiques d'évolution du NDVI sur les points d'échantillonnage sur les 5 années d'études, on constate que ces deux points sont en effets les deux seuls sur lesquels le NDVI suit une baisse moins importante et plus lente après le pic de croissance. Ces deux points ont les valeurs de NDVI les plus élevées sur la période 2, sur les 5 années d'études.

Il semblerait que ces résultats, similaires, s'expliquent de 2 manières différentes pour les 2 plots.

Le plot 67 est situé sur la zone humide, qui a une dynamique d'évolution du NDVI un peu différente comparé au reste de la zone de mesure, puisque celui-ci augmente plus lentement lors de la phase de croissance, mais se maintient à des valeurs plus élevées après le pic de croissance, certainement grâce à l'apport d'eau important et constant de la zone humide. Le plot 66 est lui située dans une combe, au point le plus élevé de la zone de mesure (+ 35 mètres d'altitude moyenne). C'est par ailleurs la zone sur laquelle la date de fonte du couvert neigeux est la plus tardive, et elle est recouverte de *Vaccinium myrtillus*, ce qui fait exception sur la zone de mesure. Ceci

implique que la dynamique d'évolution du NDVI est décalée par rapport au reste de la zone de mesure, avec un début plus tardif, mais une chute également plus tardive, grâce notamment aux réserves d'eau plus importante sur la zone, qui peut s'expliquer par les dynamiques particulières de fonte du couvert neigeux.



Il est difficile de tirer plus de conclusions de cette analyse de clustering sur la période 2. Il semblerait que les dynamiques d'évolution soient très similaires sur l'ensemble de la zone (figure 6), et il faudrait certainement utiliser des données satellitaires avec une résolution spatiale et temporelle plus fine pour obtenir des résultats plus significatifs. Les principales différences spatiales de l'évolution du NDVI semble être dans l'amplitude et la vitesse à laquelle la valeur de NDVI chute après le pic de croissance, ceci étant probablement lié à différents paramètres non pris en compte dans cette étude, tels que la nature du sol, les réserves hydriques du sol ou la composition du couvert végétal.

Suivi du NDVI - Année 2022 Col du Lautaret

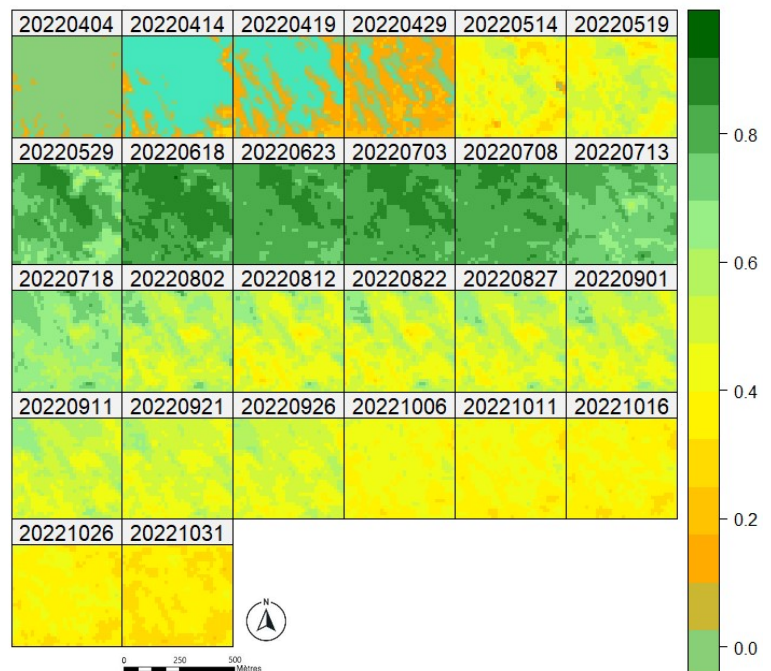


Figure 7. Série temporelle de l'évolution de l'indice NDVI sur la zone de mesure sur la période avril – octobre 2022, selon les données satellites Sentinel - 2. La valeur de l'indice NDVI du couvert végétal est situé entre 0.1 et 1, le figuré bleu (valeur < 0.1) représente le couvert neigeux.

- **Analyse inter – années : comparaison des dynamiques entre les années**

Lien avec les conditions météorologiques :

Plusieurs variables météorologiques ont été comparées entre elles sur la période 2018 – 2022, pour évaluer les différentes tendances annuelles (figure 9). Ces variables ont ensuite été mises en relation avec l'évolution de la valeur du NDVI sur les 5 années d'études, moyennée sur les 19 points d'échantillonnage (figure 8).

Durant l'année 2022, une date de fonte précoce, couplée à une pluviométrie particulièrement faible et une température moyenne élevée sur toute la période peuvent expliquer la chute marquée du NDVI après le pic.

En 2020, la date de fonte précoce ainsi qu'une température moyenne élevée sur la période semble être les facteurs principaux expliquant l'amplitude plus importante de la baisse du NDVI après le pic, et ceci malgré une pluviométrie importante.

Les années 2018 et 2019 ont une température moyenne normale et une pluviométrie relativement faible sur la période, mais la baisse du NDVI après le pic est moins rapide que pour 2020 et 2022. Le facteur principal expliquant ce phénomène semble être une date de fonte des neiges bien plus tardive ces années là (+ 17 jours en 2019, + 27 jours en 2018).

L'année 2021 enregistre la baisse la plus douce sur la période d'étude, associée à une pluviométrie très importante sur la période avril – octobre, ainsi qu'une température moyenne plus faible (-2,4 °C par rapport à la moyenne des 4 autres années), malgré une date de fonte des neiges relativement précoce.

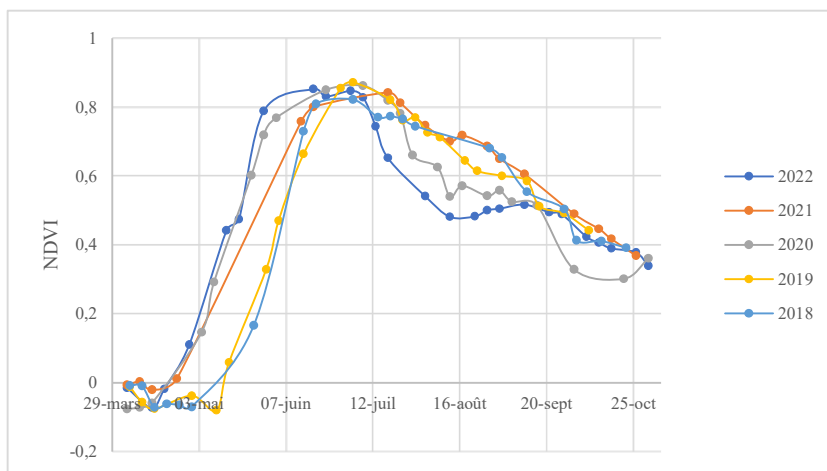


Figure 8. Comparaison interannuelle de l'évolution de l'indice NDVI sur la zone de mesure durant la période de croissance sur les années 2018 à 2022 selon les données Sentinel - 2. Pour chaque année est représentée la moyenne des 19 points de mesure.

(A)

	Date de début de fonte	Pluviométrie cumulée sur l'année (mm)	Pluviométrie cumulée 1/04 au 16/10 (mm)	°C jour cumulés 1/04 au 16/10 (°C)	°C jour cumulés sur l'été (1/07 au 31/08) (°C)	Température quotidienne moyenne sur l'été (°C)
2022	19-avr	1108	537	2528	1099	17,7
2021	23-avr	1343	805	1986	869	14
2020	19-avr	1734	693	2228	1002	16,2
2019	07-mai	1283	670	2203	993	16
2018	17-mai	1465	519	2348	979	15,8

(B)

Pluviométrie mensuelle	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
2022	101,4	76,7	68,8	44,4	113,5	111,8
2021	66,6	250,0	66,7	96,4	99,7	140,3
2020	31,8	263,6	107,4	31,9	182,6	77,4
2019	93,9	102,8	116,2	93,9	103,9	45,9
2018	72,5	99,7	77,2	80,6	91,9	56,6

Figure 9. Variabilités interannuelles de plusieurs variables météorologiques calculées selon les données satellitaires Sentinel – 2 et Landsat (date de début de fonte) ou récoltées par la station météorologique du col du Lautaret (A) et variabilité interannuelle de la pluviométrie mensuelle sur la période avril – septembre (B) sur la période 2018 – 2022.

3.1.2. Etude des tendances d'évolution de la valeur du NDVI au cours de la saison de croissance sur la période 2000 – 2022 avec les données satellitaires MODIS :

La comparaison des courbes d'évolution du NDVI sur la zone de mesure entre les deux décennies (figure 10) permet de distinguer une différence de l'aire sous la courbe de + 6,9 %, exclusivement située sur la période qui précède le pic, jusqu'à fin juin. Cette différence traduit une fonte des neiges plus précoce (- 10 jours en moyenne), qui induit un début de croissance du NDVI plus précoce également. La vitesse de croissance diminue cependant légèrement sur la période 2011 – 2022 (comme montré par les équations de courbes de tendances, figure 10), et la différence entre la date du pic de croissance sur les deux décennies est plus faible (+ 3 jours en moyenne) que la différence entre les dates de début de croissance (figure 11).

On observe donc une augmentation globale de la durée de la période de croissance, entre la date à laquelle la neige commence à fondre et la date à laquelle le NDVI atteint son maximum, de + 14 jours en moyenne.

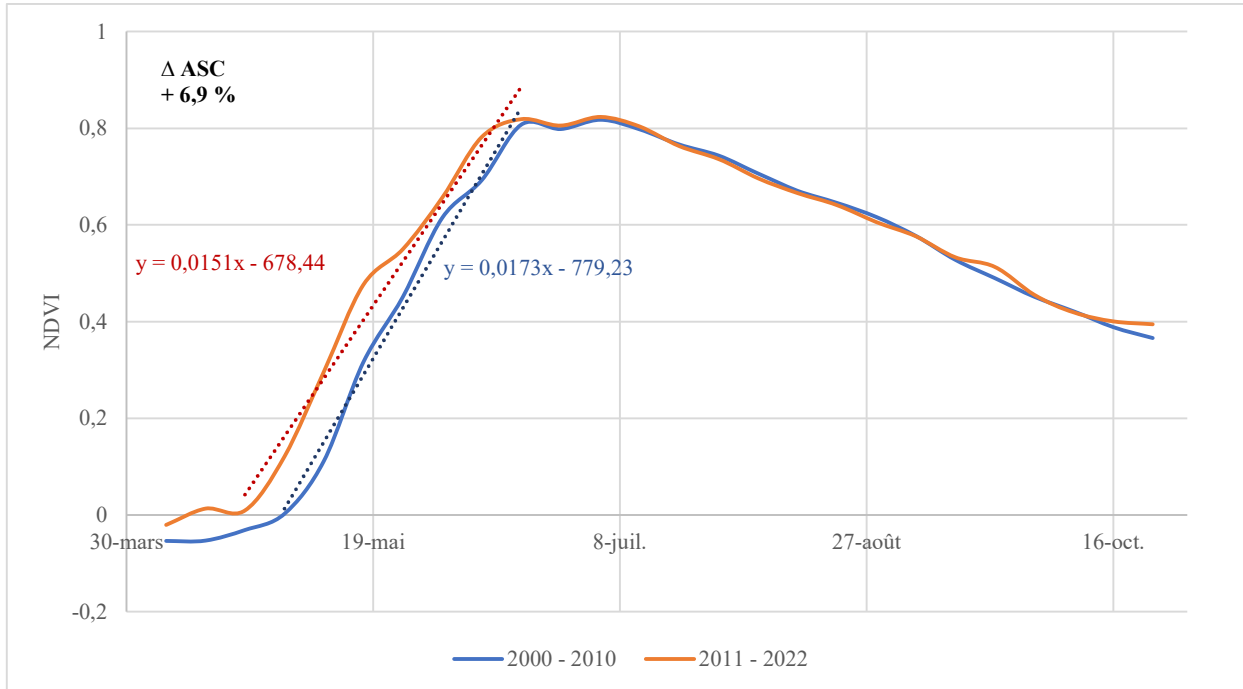
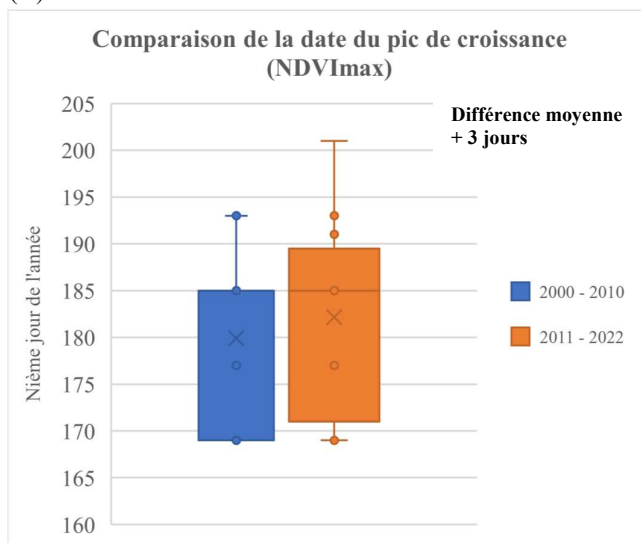
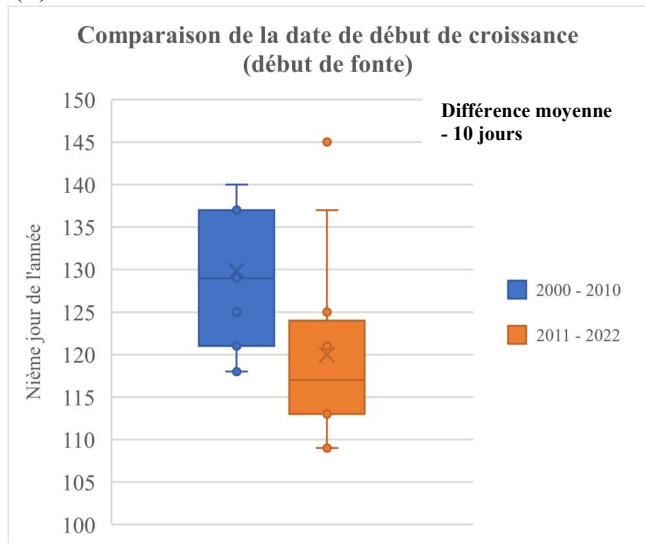


Figure 10. Courbes d'évolution moyenne du NDVI durant la décennie 2000 – 2010 (bleu) et 2011 – 2022 (rouge) sur la période de croissance de la végétation, calculées sur la zone de mesure du site de l'étude avec les données satellitaires MODIS. Les droites de tendance et leurs équations sur la période de croissance de la végétation sont affichées. ASC = Aire sous la courbe.

(A)



(B)



(C)

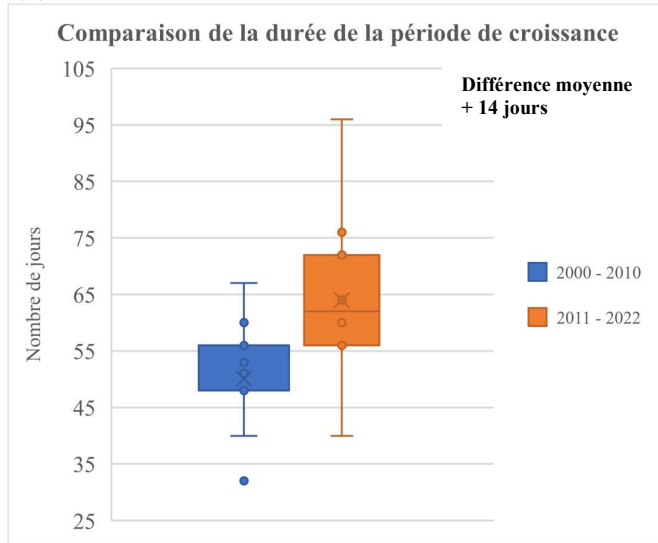


Figure 11. Comparaison de différents indicateurs environnementaux entre les deux dernières décennies, 2000 – 2010 et 2011 – 2022, calculés selon les données satellitaires MODIS. La période de croissance a été étudiée, en analysant les dates moyennes sur la décennie de la valeur maximale du NDVI, correspondant au pic de croissance (A), la date de début de croissance, correspondant au début de fonte du couvert neigeux (B), et la durée de la période de croissance (C).

3.2. Etude de la composition du couvert végétal : calculs d'indicateurs de biodiversité et délimitation spatiale de zones à couvert végétal particulier :

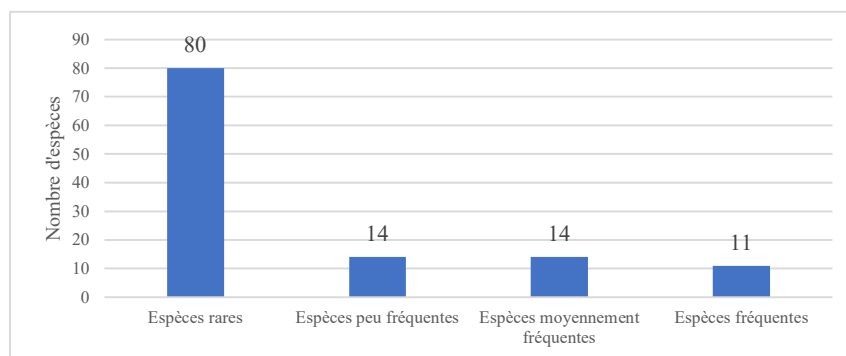
L'étude la composition du couvert végétal a été faite en fonction de plusieurs variables, telles que la durée d'enneigement, l'orientation et la pente du terrain, la nature du sol et l'intensité de pâturage.

Sur une zone très restreinte (400 x 400 mètres, soit environ 15 hectares), il est nécessaire d'avoir une connaissance très fine de l'évolution des variables étudiées à l'échelle spatiale. Notre suivi sur 20 points d'échantillonnage, associé à notre manque de données concernant différentes variables essentielles dans ce genre d'études nous ont permis de ne dégager des conclusions que parcellaires et incomplètes. Néanmoins, nous avons essayé de déterminer quels étaient les micro-écosystèmes et leurs caractéristiques au sein de cet écosystème de prairie alpine, en fonction de différentes variables climatiques et au regard de la composition du couvert végétal sur chaque points d'échantillonnage.

- **Etude générale des caractéristiques du couvert végétal**

Nous avons recensé 119 espèces végétales sur le site, appartenant à 84 genres différents. Les espèces ont été regroupées en classes de fréquence d'observations, allant des espèces rares (recensées dans moins de 20% des relevés) aux espèces fréquentes (recensées dans au moins 50% des relevés) (figure 12).

Afin de comparer les points d'échantillonnage entre eux, nous nous sommes limités à l'analyse de la présence/absence et de l'abondance des 11 espèces classées « fréquentes », dont voici la liste : *Anthoxanthum odoratum* (Flouve commune), *Arnica montana* (Arnica des montagnes), *Carex sempervirens* (Laiche), *Centaurea uniflora* (Centaurée uniflore), *Festuca paniculata* (Fétuque paniculée), *Festuca rubra* (Fétuque rouge), *Luzula pediformis* (Luzule penchée), *Meum athamanticum* (Cerfeuil des Alpes), *Plantago alpina* (Plantain des Alpes), *Potentilla aurea* (Potentille dorée), *Trifolium alpinum* (Trèfle alpin).



Espèces fréquentes : recensées dans au moins 50% des relevés.

Espèces moyennement fréquentes : recensées dans 30 à 49% des relevés.

Espèces peu fréquentes : recensées dans 20 à 29% des relevés.

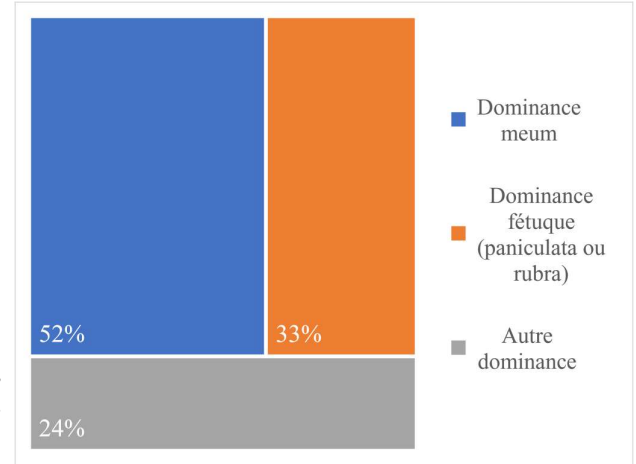
Espèces rares : recensées dans moins de 20% des relevés.

Figure 12. Répartition des espèces recensées sur les points d'échantillonnage de la zone de mesure en 4 classes de fréquences d'observations : rares, peu fréquentes, moyennement fréquentes et fréquentes.

Nous observons que 85% des points d'échantillonnage ont comme espèce dominante *Meum athamanticum* ou *Festuca sp.* (figure 13). *Festuca sp.* et *Meum athamanticum* font partie des 3 espèces majoritaires dans respectivement 90% et 70% des plots, et ont été observées dans plus de 90% des recensements (figure 14).

Festuca sp. représente ici deux espèces distinctes, regroupées pour analyser les dominances : *Festuca paniculata* et *Festuca rubra*.

Figure 13. Répartition des espèces majoritaires recensées sur les points d'échantillonnage de la zone de mesure.



	<i>Festuca paniculata</i>	<i>Festuca rubra</i>	<i>Meum athamanticum</i>
Fréquence d'observation	76%	52%	95%
% de plots où elle fait partie des 3 espèces majoritaires	62%	43%	76%
% de plots où elle est l' espèce majoritaire	19%	14%	52%

Figure 14. Comparaison de plusieurs indicateurs de dominance des trois espèces les plus abondantes sur la zone de mesure : *Festuca paniculata*, *Festuca rubra* et *Meum athamanticum*.

Par ailleurs, nous avons calculé différents indicateurs de biodiversité sur nos relevés d'échantillonnage, tels que l'indice de Shannon – Weaver et l'équitabilité. Les résultats obtenus pour chaque points d'échantillonnage sont montrés en annexe 6.

Nous observons que le nombre d'espèces n'est pas toujours proportionnel à l'indice d'équitabilité, c'est-à-dire qu'un grand nombre d'espèce n'implique pas nécessairement une valeur d'équitabilité élevée. Ceci implique l'hypothèse que certaines espèces peuvent avoir un impact sur la développement des autres espèces dans nos points de mesures, probablement par phénomène de compétition.

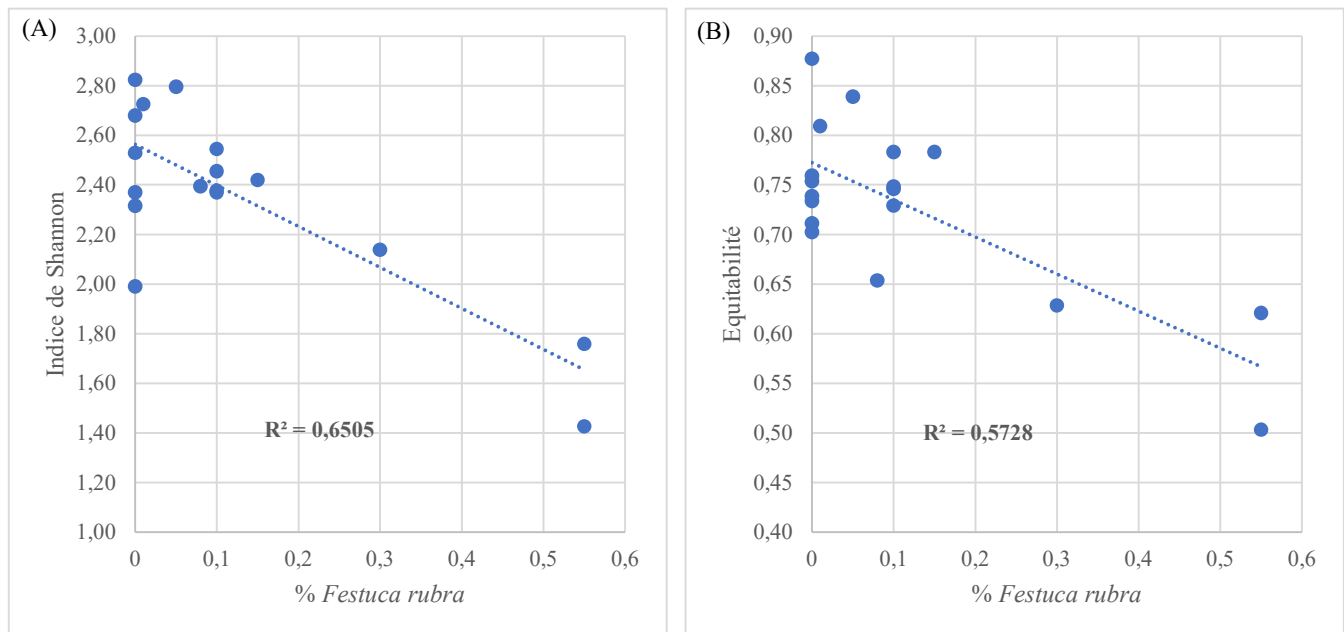


Figure 15. Analyse de corrélation du pourcentage d'abondance de l'espèce *Festuca rubra* sur les 20 points d'échantillonnage, en fonction de deux indices environnementaux : l'indice de Shannon (A) et l'indice d'équitabilité (B).

Nous avons cherché à comparer les données d'abondance relative des 11 espèces fréquentes citées ci-dessus avec l'indice d'équitabilité et la diversité spécifique à chaque points d'échantillonnage. Les résultats montrent un indice de corrélation fort pour le genre *Festuca*, et plus particulièrement l'espèce *Festuca rubra* (figure 15).

Une forte abondance de *Festuca rubra* a un impact négatif sur la quantité et la répartition des espèces, impliquant l'hypothèse que *Festuca rubra* a un comportement dominant et est plus avantagé que les autres espèces avec qui elle entre en compétition sur certains points d'échantillonnage, pour prendre une place plus importante au sein de l'écosystème.

- **Trois zones très nettes : zone humide, pelouse à Nard raide et prairie subalpine à Fétuque paniculée**

Nous avons mis en place plusieurs méthodes pour analyser la répartition des espèces et trouver d'éventuels regroupements spatiaux selon le couvert végétal.

L'analyse factorielle des correspondances (AFC), réalisée sur les abondances relatives de chaque espèce végétale sur les 20 points d'échantillonnage, a permis de dégager trois groupes différents : plot 67, plot 137, autres plots (figure 16).

Le graphique des contributions en fonction des espèces (figure 16) nous indique quelles sont les espèces caractéristiques qui contribuent à la différenciation des plots 67 et 137. Pour le plot 67, ce sont les espèces *Carex flacca*, *Molinia caerulea* et *Trichophorum cespitosum*, trois espèces typiques des tourbières et zones humides. Concernant le plot 137, l'espèce qui se dégage est *Nardus stricta*, espèce particulièrement peu pâturée, et qui peut devenir très envahissante. Elle prospère notamment sur les milieux à fertilité réduite, en particulier sur les sols à pH très faible.

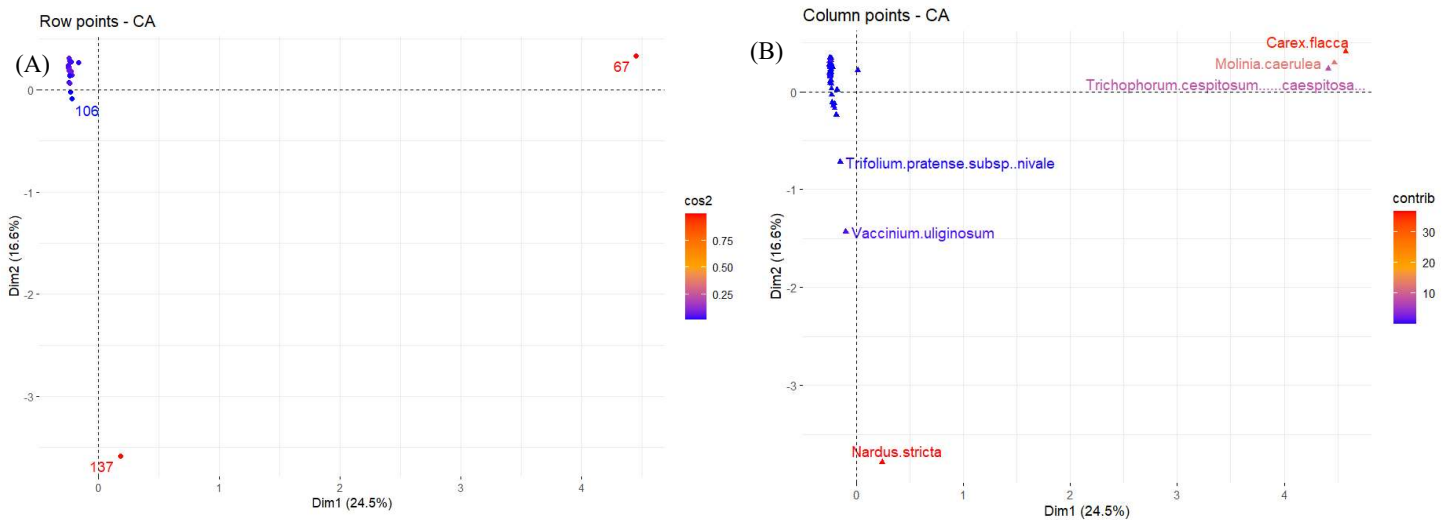


Figure 16. Analyse des correspondances, résultants de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) sur l'abondance relative des espèces végétales sur chaque points d'échantillonnage, et contributions des deux dimensions principales de l'étude sur les points (A) et sur les espèces végétales (B).

Ces deux plots sont très isolés, et ne partagent que très peu, voir aucune espèce végétale en commun, ni entre elles, ni avec l'ensemble des autres plots (figure 20).

Comme vu précédemment, le reste des plots est relativement similaire entre eux dans la composition de leur couvert végétal, dominés par les espèces *Meum athamanticum* et *Festuca sp.*.

Nous observons donc sur notre zone de mesure 3 micro-écosystèmes très différents les uns des autres. Une zone humide, tourbeuse, située au nord – est de la zone de mesure, est adjacente à une pelouse dominée par *Nardus stricta*, caractéristique d'un sol à pH très faible, située en fond de pente et à proximité d'un ruisseau. Enfin, la grande majorité de la surface de la zone de mesure pourrait être qualifiée de prairie subalpine à Fétuque paniculée, caractéristique des prairies de pâturage d'altitude dans les Alpes.

- Dans la prairie à fétuque paniculée, différentes variations et micro-écosystèmes

L'analyse visuelle du couvert végétal sur le terrain nous a laissé supposer qu'il existait une multitude de micro-écosystèmes différents sur la zone de mesure, très localisés, en fonction, entre autres, de la topographie du terrain.

Nous avons donc cherché à caractériser et délimiter ces différentes zones, en s'appuyant sur les relevés botaniques, mais également sur les dynamiques d'enneigement, le relevé topographique de terrain LIDAR et les données NDVI extraites des données satellitaires Sentinel – 2.

Dans un premier temps, nous avons effectué un clustering sur les points d'échantillonnage, avec la fonction PAM (Partitining Around Medoids) du package R *cluster*. Afin de limiter le brouillage des données, nous avons décidé de ne pas prendre en compte les espèces qualifiées de « rare », c'est-à-dire présentant une fréquence d'observation inférieure à 20%.

Les résultats du clustering se sont révélés très peu exploitables (figure 17). Les deux premières dimensions de clustering, les plus significatives, n'expliquent que 12,9% et 11,5% de la variance du jeu de données. Même au regard de ces deux dimensions, les données sont très dispersées, et de fait difficile à clusteriser.

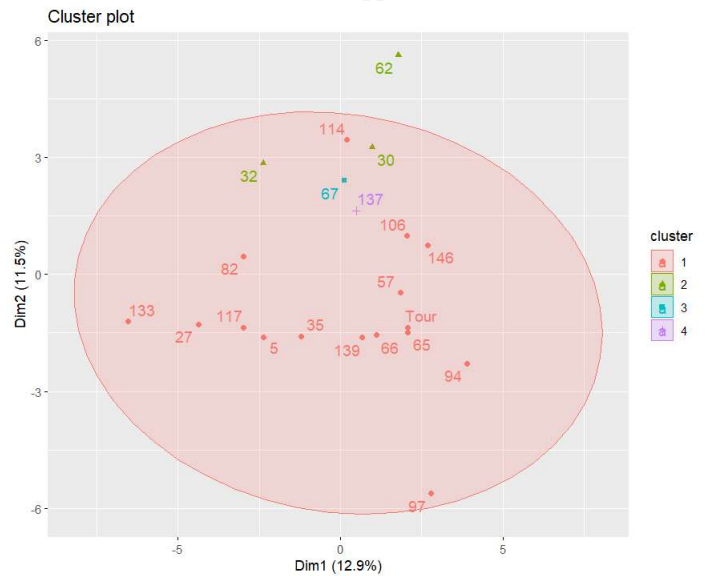


Figure 17. Graphique de contributions des points d'échantillonnage aux deux dimensions principales de l'étude, suite à un clustering sur l'abondance des espèces végétales sur chaque point avec la méthode PAM.

L'analyse du nombre optimal de clusters, avec la fonction *fviz_nbclust()* du package R *factoextra*, associée à l'application d'une analyse sur classification ascendante hiérarchique des données (CAH), calculée sur la matrice des distances du jeu de données avec la méthode de Ward, nous a toutefois permis d'obtenir 4 groupes de plots, maximisant l'inertie inter-groupes et minimisant l'inertie intra-groupes (figure 18).

Nous retrouvons les deux plots 67 et 137 isolés, et l'on observe l'apparition d'un nouveau groupe, comportant les plots 32, 30 et 62 (figure 18). Ces 3 points d'échantillonnage ont pour principal point commun une forte proportion de *Festuca rubra* (> 30%), et l'absence de *Festuca paniculata*. Il semblerait que sur ces points, la Fétuque paniculée n'ai pas réussi à se développer, remplacée par *Festuca rubra*, impliquant un mécanisme différent comparé au groupe principal. Malgré l'éloignement apparent sur le dendrogramme, ce groupe de plots n'est en réalité pas si différent des autres, partageant de nombreuses

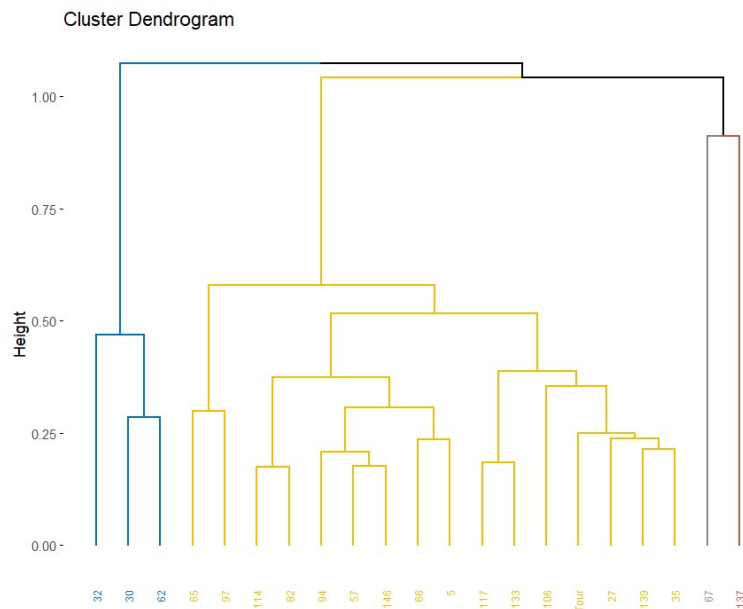


Figure 18. Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique effectuée sur les données d'abondances relatives des espèces végétales sur chaque points d'échantillonnage.

espèces en commun. L'absence de Fétuque paniculée a un impact fort sur la construction de ce dendrogramme, tout les autres plots (excepté 67 et 137) ayant cette espèce dans leur recensement.

Nous avons ainsi cherché par un autre moyen à analyser la similarité entre les plots, en utilisant l'indice de dissimilarité de Bray-Curtis.

Cet indice, dérivé de l'indice de Sørensen, est utilisé pour quantifier la différence dans les populations d'espèces sur deux sites différents. Il est calculé grâce à l'équation suivante :

$$D_{\text{Bray-Curtis}_{j,k}} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{ij} - y_{ik}|}{\sum_{i=1}^n (y_{ij} + y_{ik})}$$

L'indice de Bray-Curtis est compris entre 0 et 1, une valeur de 0 correspondant à l'absence de dissimilarité, c'est-à-dire que les deux plots partagent exactement la même composition d'espèces, et une valeur de 1 correspondant à une dissimilarité totale, c'est-à-dire que les deux plots n'ont aucune espèce en commun.

La matrice de dissimilarité de Bray-Curtis (figure 19) nous permet de confirmer que l'on observe les 4 groupes de points cités précédemment. Les points 67 et 137 sont très isolés et ne présentent quasiment aucune espèce en commun, ni entre eux ni avec les autres plots. Le groupe de plots 32, 30 et 62 sont en effet plus similaires entre eux qu'avec les autres plots, mais ce sont les 30 et 62 qui sont les plus proches, principalement à cause de leur pourcentage de *Festuca rubra* identique (55%). Enfin, les autres plots présentent des similarités plus ou moins équivalentes, comprises entre 0.4 et 0.6, sans toutefois observer de tendances suffisamment importantes pour réaliser des sous-groupes au sein de ce groupe.

Avec les difficultés que nous avons rencontrées pour réaliser un clustering pertinent, nous avons finalement décidé d'observer la répartition des 11 espèces végétales majoritaires dans les 19 points d'échantillonnage, en comparaison au relevé topographique de terrain LIDAR, dans l'objectif de mettre en relation les caractéristiques topographiques du terrain avec la composition floristique des plots (figure 20).

Nous nous sommes basés pour cette analyse spatiale sur plusieurs espèces « indicatrices », caractéristiques de milieux aux conditions climatiques et biologiques particulières. Nos observations sur le terrain, en autres, nous ont permis de faire le lien entre certaines caractéristiques environnementales et ces espèces indicatrices sur notre zone de mesure.

L'espèce *Vaccinium myrtillus* est caractéristique des milieux plutôt secs, en pente. Les espèces *Festuca sp.* sont assez ubiquiste dans cet environnement, mais on observe que la Fétuque paniculée apprécie les milieux plutôt secs, tandis que *Festuca rubra* est dominante sur cette dernière dans les zones plus fraîches. *Festuca laevigata* est elle typique des milieux très secs. Les espèces *Carex panicea* et *Trollius europaeus* indiquent une présence d'eau importante dans le sol. *Veratrum album* se développe sur les pelouses fraîches et les zones riches en

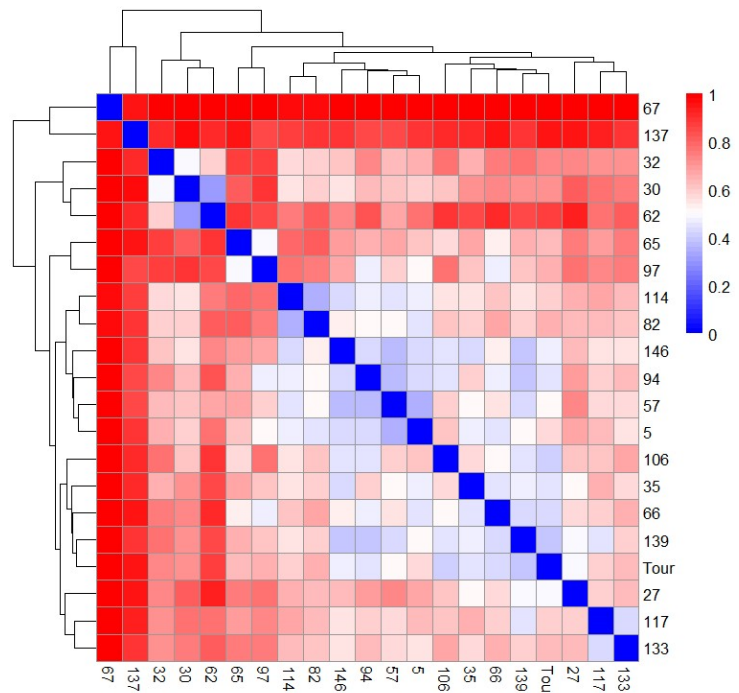


Figure 19. Matrice de dissimilarité de Bray-Curtis calculée sur les valeurs d'abondances relatives des espèces végétales sur chaque point d'échantillonnage. Les valeurs de la matrice correspondent aux valeurs de l'indice de Bray-Curtis, une valeur de 0 indiquant une similarité complète et une valeur de 1 une dissimilarité complète.

éléments minéraux et en azote, comme *Nardus stricta*. Enfin, les espèces *Carex flacca*, *Molinia caerulea* et *Trichophorum cespitosum* sont typiques des zones humides.

On observe que la microtopographie joue un impact fondamental sur la composition du couvert végétal. Prenons l'exemple des points 139, 146 et 94, tous trois positionnés dans une même combe, à 50 mètres d'intervalle. Si leur composition est similaire (24 espèces en commun), on observe des différences dans l'abondance relative des 11 espèces « fréquentes ».

Le point 146 est situé dans une légère pente orientée nord, tandis que les points 139 et 94 sont à l'inverse positionnés dans une pente orientée sud. La composition végétale traduit cette différence : on observe la présence de *Vaccinium myrtillus* sur les points 139 et 94, et non sur le 146. Par ailleurs, l'espèce *Festuca rubra*, qui a tendance à prendre le dessus sur *Festuca paniculata* dans les milieux plus frais, est présente au point 146, tandis qu'elle ne concurrence pas *Festuca paniculata* sur les deux autres points.

On constate de fait que les très légères différences dans le relief peuvent induire des différences significatives dans la composition du couvert végétal, même au sein d'une même combe et à des intervalles de distance de l'ordre de la dizaine de mètres. Une pente, une orientation ou une exposition différente, même légère, induisent des différences dans la durée et l'épaisseur du couvert nival, la température, l'exposition au soleil et au vent, ...

Néanmoins, il est très difficile d'expliquer toute la complexité et la diversité du couvert végétal au seul regard de variables topographiques.

3.3. Observation des dynamiques spatio-temporelle de fonte du couvert neigeux sur la période 2014 – 2023 :

On observe une durée de fonte (= durée, en jours, entre le début de la fonte et la date à laquelle la couverture neigeuse est de 0 +/- 2%) de 47 jours (+/- 13 jours) en moyenne sur les 10 années d'observations (figure 22). On observe une vitesse de fonte moyenne de 2,65 % de la surface totale par jour sur les 10 années d'observation, ce qui correspond à environ – 8 200 m² de neige / jour en moyenne, calculée sur la période de fonte, c'est-à-dire entre la date de début de fonte et la date à laquelle la couverture neigeuse est nulle (+/- 2%). La vitesse de fonte est dépendante des conditions météorologiques, mais elle semble relativement régulière au cours d'une saison, et entre les années.

La combinaison de la durée de fonte et de la vitesse de fonte constante implique qu'il existe une différence de couverture neigeuse de 47 jours maximum entre la première et la dernière zone à fondre.

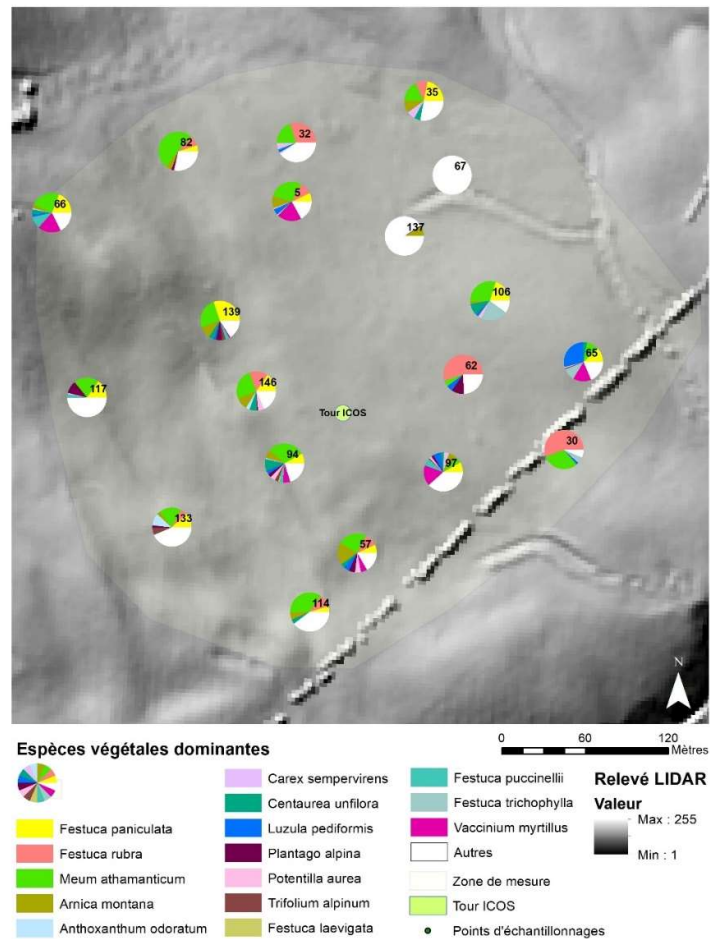


Figure 20. Carte de répartition des 15 espèces végétales majoritaires sur les points d'échantillonnage de la zone de mesure, superposée à un relevé topographique de terrain LIDAR d'une précision de 1 mètre.

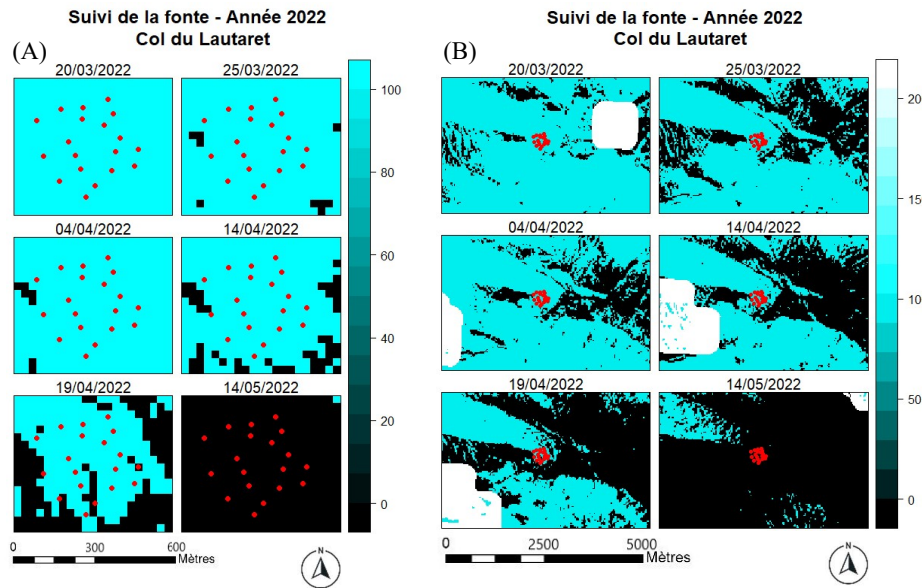


Figure 21. Suivi de la dynamique de fonte du couvert neigeux sur l'année 2022 avec les données Neige du pôle Théia du CNES sur la zone de mesure (A) et sur une zone large englobant le col du Lautaret et alentours (B). La neige est représentée par le figuré bleu, les nuages par le figuré blanc, et le figuré noir représente l'absence de couvert neigeux

L'observation spatiale de la dynamique de fonte, réalisée sur le logiciel Arcgis, et avec un relevé topographique de terrain LIDAR, montre nettement un effet de combe/crête sur la zone de mesure (figure 21, annexe 8). On peut observer des différences de durée d'enneigement de +/- 30 à 45 jours entre les combes et les crêtes, ce qui implique nécessairement un impact important sur le fonctionnement de l'écosystème.

Année	SMOD	Durée de fonte (en jours)	Vitesse de fonte (en %/jour)	Vitesse de fonte (en m ² /jour)
2015	15-avr	32	3,23	10058,2
2016	05-avr	40	2,29	7131,1
2017	10-avr	56	3,37	10494,2
2019	30-avr	34	2,38	7411,3
2020	12-avr	69	2,48	7722,7
2021	30-mars	57	2,23	6944,2
2022	14-avr	40	2,55	7940,7
Moyenne	12-avr	46,9	2,6	8243,2
Ecart-type		13,9	0,5	1434,1

Figure 22. Variabilités interannuelles de différents indicateurs de la dynamique de fonte du couvert neigeux sur la zone de mesure entre les années 2015 à 2022. Les années 2014, 2018 et 2023 ont été supprimées par manque de données.

3.4. Analyse du relevé hyperspectral de terrain : calculs et interprétation d'indices hyperspectraux de végétation :

Le relevé hyperspectral sur lequel nous avons travaillé a été effectué en août 2008. Nous avons observé sur l'analyse de l'évolution annuelle du NDVI avec les images Sentinel – 2 que la période mi-juillet – fin août est celle où les différences de valeur entre les plots sont maximales. Les dynamiques de diminution du NDVI après le pic peuvent être très différentes selon les zones, à cause des différents facteurs cités précédemment. De fait, l'analyse hyperspectrale des indicateurs cités plus haut est très informative à cette période là, notamment grâce aux stades de sénescence très échelonnés entre les différentes espèces végétales.

3.4.1. Structural :

L'indice de végétation amélioré (*Enhanced Vegetation Index*) est une version améliorée de l'indice de végétation normalisé (*Normalized Vegetation Index*, NDVI) (Roberts, Roth, Perroy 2011) que nous avons principalement utilisé au cours de notre étude. L'EVl, en utilisant des longueurs d'ondes supplémentaires, permet de corriger certaines imprécisions qui peuvent être imputées au NDVI, en s'affranchissant de certaines variables telles que la variation de l'angle d'incidence solaire, les conditions atmosphériques ou l'influence de la réflectance du sol.

Le NDVI semble globalement très homogène sur l'ensemble de la zone de mesure (figure 23-A), autour de 0,9. Cette donnée semble étonnante pour plusieurs raisons : en août, la valeur moyenne du NDVI selon les données extraites via le satellite MODIS varie de 0,7 en début de mois à 0,6 en fin de mois pour le mois d'août 2008. Par ailleurs, nous savons grâce au clustering effectuée sur les valeurs NDVI extraites des données satellitaires Sentinel – 2 que les différences de valeurs entre les différentes zones sont importantes à cette période, pouvant aller jusqu'à +/- 0,3.

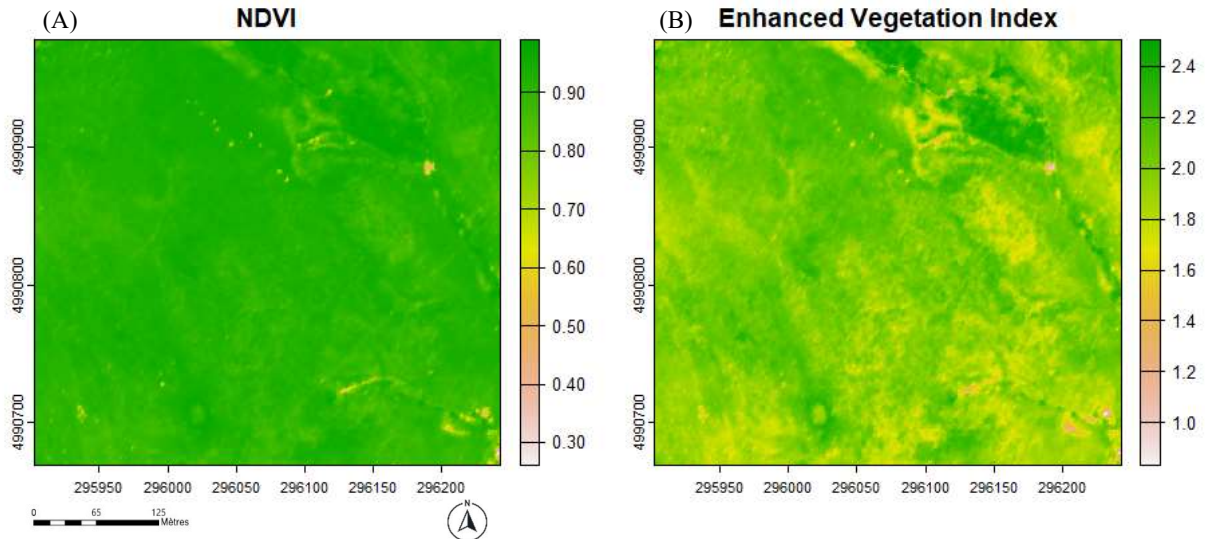


Figure 23. Carte des indices hyperspectraux de végétations Normalized Vegetation Index (A) et Enhanced Vegetation Index (B) sur la zone de mesure.

L'indice NDVI étant moyennement satisfaisant, nous avons décidé de le comparer à l'indice EVI afin de choisir le plus informatif des deux. Il s'avère que l'indice EVI, corrigé par rapport au NDVI, semble bien plus pertinent à analyser (figure 23-B). Nous observerons de véritables différences spatiales entre les différentes zones observées à travers nos études et sur le terrain. Nous avons donc choisi d'analyser l'indice EVI sur ce relevé hyperspectral, l'indice NDVI semblant être sensible à des paramètres extérieurs.

L'analyse de l'indice EVI sur la zone de mesure permet de distinguer plusieurs zones en corrélation avec la microtopographie et les caractéristiques de sol (figure 24). On observe sur la zone humide la valeur d'EVI la plus importante, sauf sur les zones où l'eau libre prend la place de la végétation. Les pentes exposées au sud, comme autour des points 117, 106 et 65, ont les valeurs les plus faibles, tandis que les combes et les zones exposées au nord, où l'enneigement est le plus tardif notamment, ont des valeurs d'EVI plus importante.

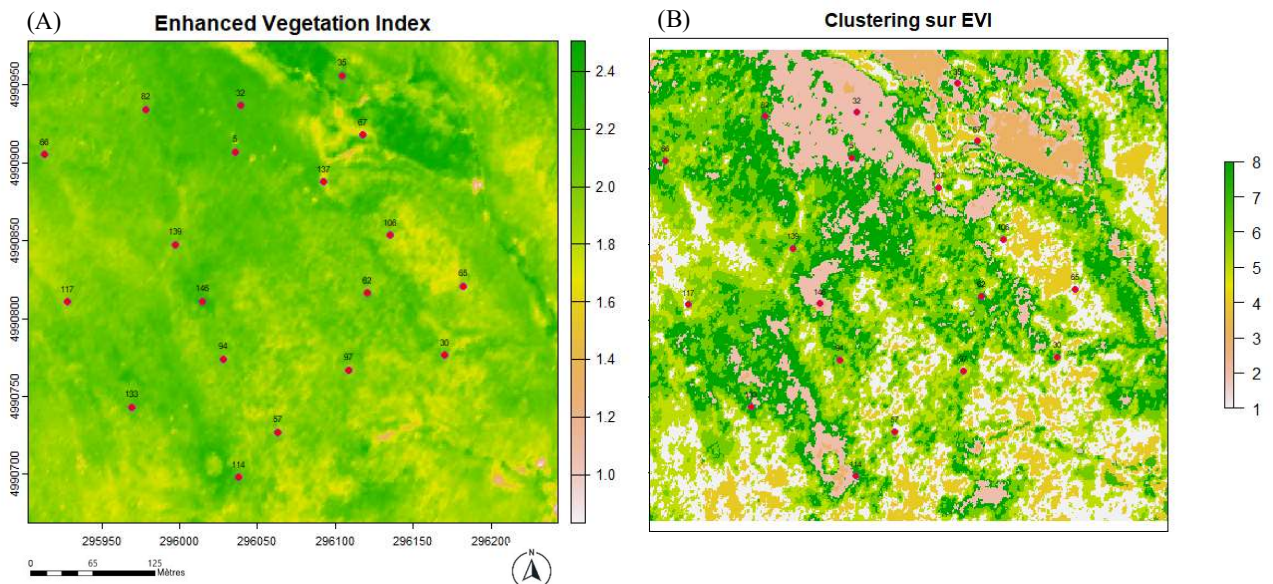


Figure 24. Carte de l'indice hyperspectral de végétation Enhanced Vegetation Index (A) et représentation spatiale de la mise en classe en 8 clusters de cet indice EVI (B) sur la zone de mesure. Les points d'échantillonnage sont représentés avec leur label sur les deux cartes.

3.4.2. Biochimique :

- *Chlorophylle* :

Nous avons observé le taux de chlorophylle dans les feuilles sur la zone de mesure à travers 3 indicateurs : Pigment Specific Spectral Ratio (PSSR), Green Chlorophyll Index (GCI) et Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI) (annexe 1).

Le taux de chlorophylle est un indicateur important pour évaluer l'absorption de la lumière et le fonctionnement de la photosynthèse chez la plante, et donc donner une indication sur la santé de la plante.

Ces indicateurs chlorophylliens sont assez corrélés avec les indices NDVI et EVI, puisque ces derniers mesurent également l'absorbance de la chlorophylle (a et b). A noter que l'indice MCARI est également sensible aux modifications de LAI, car il soustrait dans sa formule le matériel non photosynthétique.

On observe effectivement cette corrélation sur les graphiques, avec un fort indice chlorophyllien dans la zone humide, et plus faible dans les zones de pentes et exposées sud. Par ailleurs, on observe quelques « îlots » avec un taux de chlorophylle très élevé, en particulier sur les indices GCI et MCARI, autour des points 114, 146, 82 et 137. Ces îlots peuvent être dus à plusieurs facteurs : espèces végétales très vertes sur une zone très localisée, LAI particulièrement faible, combinaison de facteurs, ...

- *Caroténoïdes et anthocyanes* :

Les caroténoïdes sont des pigments essentiels aux plantes car ils jouent un rôle important dans la réponse aux stress environnementaux, notamment dans la photoprotection. En cas de stress lumineux, chez les plantes, le caroténoïde violaxanthine est dé-époxydé en zéaxanthine. Cette dernière augmente la capacité des membranes photosynthétique à former des pièges à énergie, dans un processus encore mal compris.

De fait, l'analyse du taux de caroténoïdes dans les plantes donne de nombreuses indications sur l'état de stress et le stade de sénescence du couvert végétal. Cependant, c'est l'évolution du taux de caroténoïde, plutôt que la valeur absolue à un instant t, qui est la plus informative. Si les indicateurs que nous avons calculés nous donne des informations sur les différences de taux de caroténoïdes entre les zones, nous n'avons pas d'informations sur les tendances et les dynamiques d'évolution, et les différences de valeur que nous observons peuvent simplement être dus à des différences de taux de caroténoïdes inhérents aux espèces.

Par ailleurs, les différences en valeur absolue mises en évidence sur la zone de mesure pour les 4 indicateurs sont très faibles, et non significatives (annexe 1). Les résultats en l'état sont donc difficilement analysables.

- *Eau* :

La répartition des réserves hydriques du sol, souterraine, peut en réalité être dévoilée par les caractéristiques du couvert végétal. L'analyse de deux indicateurs inter corrélés, l'un concernant l'humidité contenue dans les feuilles et la matière vivante du couvert végétal (Normalized Difference Moisture Index, NDMI), l'autre donnant des informations sur l'état de stress hydrique des plantes (Moisture Stress Index, MSI), nous permet d'observer la répartition des zones en fonction de l'état hydrique du sol, plus ou moins humide (figure 25).

Les deux indicateurs semblent intimement corrélés à la microtopographie. Les combes, la zone humide, les zones exposés au nord montrent des indices d'humidité très positifs, à l'inverse des pentes exposées sud et des crêtes où le stress hydrique est beaucoup plus important.

Par ailleurs, les indices d'humidité sont très corrélés à l'indice EVI, sauf pour la zone à dominance *Vaccinium myrtillus*, entre les points 66, 82 et 139. Celle-ci a un indice EVI moyen, supérieur à la zone exposée à *Festuca paniculata* située plus au sud, mais des indices NDMI et MSI inférieurs à cette zone, indiquant un stress hydrique plus important.

Ceci peut s'expliquer par le fait que l'espèce *Vaccinium myrtillus* est une espèce de zones à tendance sèche, nécessitant peu d'eau, avec une forte proportion de matériel non photosynthétique et des feuilles fines et sèches. Malgré tout, elle maintient un couvert aérien très vert, donnant un indice EVI élevé.

Ce cas de figure nous indique que les indices EVI et NDVI ne sont pas nécessairement corrélés au taux d'humidité des feuilles. Des caractéristiques propres à certaines espèces peuvent influencer sur ces indicateurs autrement que les seules variables d'humidités relatives du sol et des plantes.

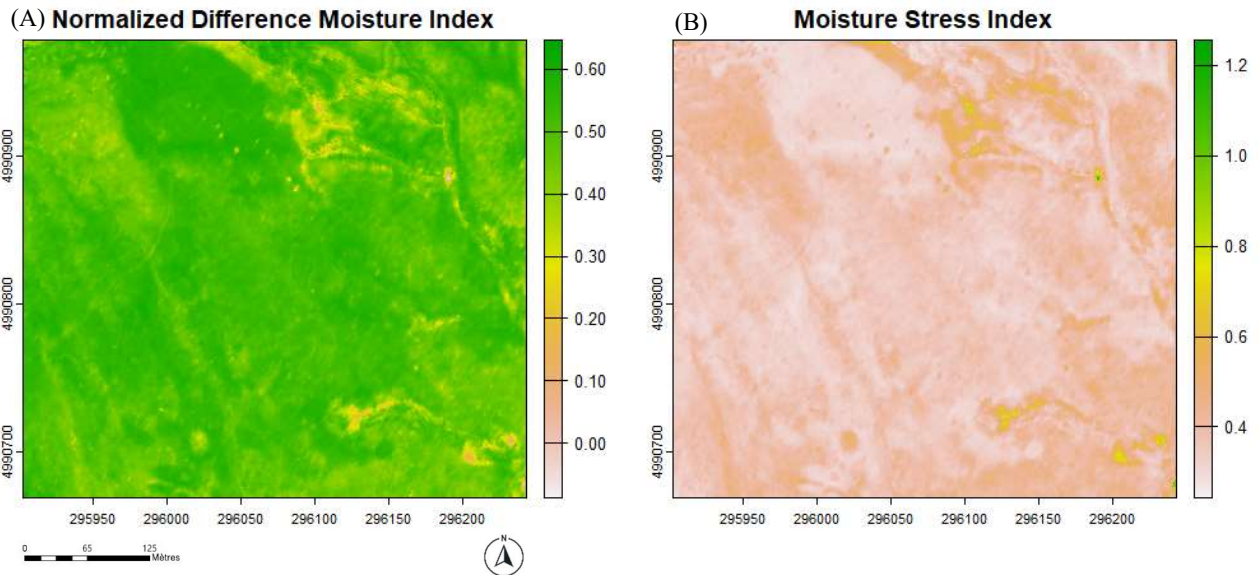


Figure 25. Carte de deux indices hyperspectraux de végétations indicateurs du taux d'humidité relative dans le couvert végétal de la zone de mesure : Normalized Difference Moisture Index (A) et Moisture Stress Index (B).

L'indice NDWI (Normalized Water Index) nous permet de détecter l'eau en surface (annexe 1). On observe plusieurs masses d'eau exposées, ainsi qu'une valeur de NDWI plus importante autour du point 67, pouvant indiquer de l'eau en surface associées à un couvert végétal plus clairsemé.

3.4.3. Physiologique :

- *Stress & efficacité d'utilisation de la lumière :*

Les facteurs de stress et d'efficacité d'utilisation de la lumière peuvent être très corrélés. Une plante stressée, à cause du changement dans la composition de ses pigments, va voir sa capacité à utiliser la lumière absorbée par les chlorophylles fortement diminuée. C'est ce que mesure par exemple l'indice Photochemical Reflectance Index (PRI) (annexe 1).

De la même manière que pour les indicateurs des taux de pigments (caroténoïdes et anthocyanes) dans la plante, l'observation des indicateurs de stress environnementaux sur le couvert végétal n'est pertinente que sur une série de mesure et sur la dynamique d'évolution de ces indicateurs.

Nous observons toutefois toujours la zone humide clairement délimitée sur les trois indicateurs, tous indiquant un état de stress plus important sur cette zone, de la même manière que sur la zone à dominance *Vaccinium myrtillus*. La zone à dominance *Veratrum album*, elle, semble à l'inverse dans un état de stress moins important.

Nous pouvons difficilement tirer de plus amples conclusions sur ces indicateurs, car, comme dit précédemment, la véritable information réside dans leur dynamique d'évolution dans le temps, et non sur une comparaison des valeurs absolues à l'instant t.

3.5. Croisement des données et création d'une carte de répartition des principaux couverts végétaux :

L'analyse des variables présentées dans cette étude permet d'obtenir un aperçu large et varié de leurs différentes dynamiques d'évolution spatiale au cours de la saison. Plus particulièrement, les indices hyperspectraux de végétation (HVIs), bénéficiant d'une résolution très fine (80 centimètres), nous ont permis de différencier

nettement plusieurs zones au sein de la zone de mesure. La carte ci-dessous (figure 26) présente un zonage en fonction de couverts végétaux caractéristiques, pouvant être une espèce particulièrement dominante, un relief ayant une forte influence sur le couvert ou un micro-écosystème isolé. Cette carte a été réalisée en croisant et recoupant l'ensemble des variables présentées dans cette étude et les observations visuelles effectuées sur le terrain tout au long de la saison.

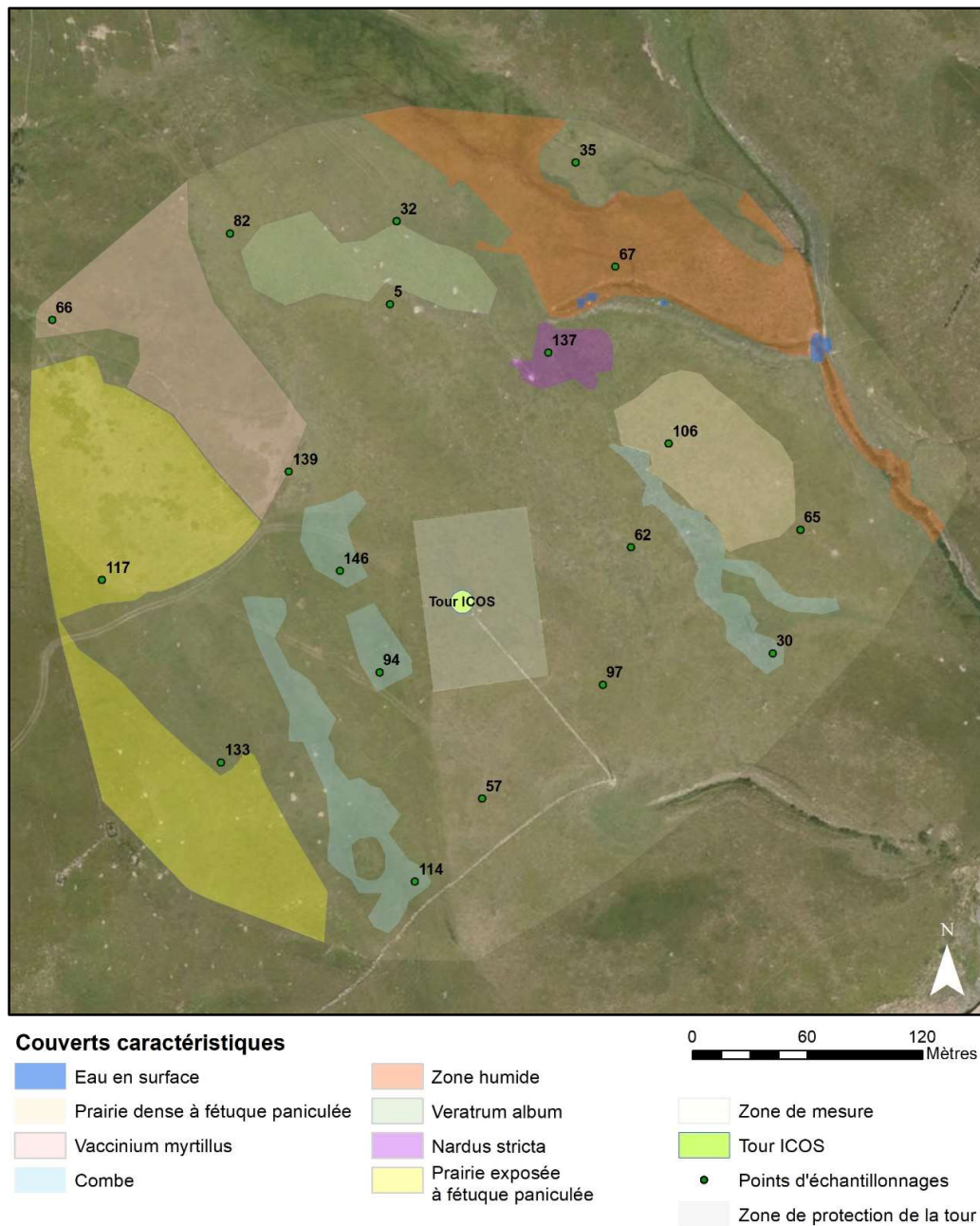


Figure 26. Carte de répartition des principaux couverts végétaux et zones d'intérêts de la zone de mesure. Les espèces significativement dominantes sur une aire suffisamment large sont représentées, ainsi que les reliefs topographiques particuliers influençant la végétation en surface et les zones à écosystèmes particuliers.

4. Discussion

L'ensemble des données récoltées et des variables analysées apporte une grande diversité d'informations, souvent complémentaires, sur les différents processus écologiques et environnementaux prenant place au sein de la zone de mesure.

La dynamique spatiale d'évolution du NDVI semble intimement corrélée aux dynamiques de fonte du couvert neigeux, au moins sur la première période, la croissance du couvert végétal étant fortement conditionnée par la date de fonte de la neige en surface. Par ailleurs, ce processus de fonte est directement lié à la microtopographie du terrain, les zones où la neige fondant en premier étant les crêtes et les pentes exposées sud, tandis que les combes peuvent conserver un couvert neigeux jusqu'à 45 jours de plus dans la saison. Enfin, nous avons observé une influence importante de ces variations topographiques sur la composition du couvert végétal, avec des similarités significatives entre les points d'échantillonnage situés dans des zones à reliefs similaires. Par exemple, l'espèce *Festuca rubra* est plus abondante que l'espèce *Festuca paniculata* dans les combes, tandis que cette dernière prend complètement le pas sur la première dans les zones moins protégées. De fait, on observe une relation à trois composantes, le couvert végétal étant dépendant des différences de reliefs, ceci pouvant être expliqué, entre autres, par l'influence de ces reliefs sur la vitesse et la date de fonte du couvert neigeux (impact sur la date de début de croissance, la température du sol, la quantité de minéraux disponibles, ...).

Grâce à l'analyse de l'évolution du NDVI au cours de la saison de croissance sur la zone de mesure durant la période 2018 – 2022, nous avons pu apporter des éléments d'explication sur les facteurs pouvant influencer les variations observées entre les années. Si la dynamique de fonte du couvert neigeux semble jouer un rôle important sur la période 1, notre étude suggère que certaines variables météorologiques (pluviométrie annuelle, pluviométrie mensuelle, température de l'air sur la période, température cumulée annuelle, date de début fonte des neiges) ont une influence prédominante sur la période 2. Il semble qu'aucun de ces facteurs isolés ne soit le seul élément explicatif, mais que c'est plutôt la combinaison de plusieurs facteurs météorologiques qui explique les variations de NDVI observées entre les années. La date de fonte du couvert neigeux ainsi que la pluviométrie mensuelle sur la période de croissance semblent cependant avoir une influence significative.

L'étude des indices hyperspectraux de végétation a été un outil très intéressant pour appuyer les différentes hypothèses formulées au cours de l'étude. Elle a été le principal outil pour construire et préciser le zonage des différents couverts végétaux, grâce à grande précision du relevé et à la diversité des indices. Nous avons observé de nettes corrélations entre la topographie, l'humidité relative du couvert végétal et l'indice EVI (Enhanced Vegetation Index) confirmant nos observations quant au lien entre topographie et couvert neigeux. De fait, la rétention d'eau dans les combes et zones exposées nord semble bien plus importante que dans les crêtes et zones exposées sud. De la même manière, les différents indices de stress environnementaux tendent dans la même direction. Enfin, la zone humide est nettement mise en relief sur la quasi-totalité des HVIs étudiés.

La carte de répartition des couverts végétaux particuliers est le produit final du travail de toute l'étude, mais ne représente pas un résumé de l'ensemble des variables étudiées. Il permet plutôt de mettre en valeur les relations significatives que nous avons pu observer entre nos variables et la composition du couvert végétal, associé à un important travail de terrain pour confirmer ou infirmer nos hypothèses. Cependant, un véritable zonage de l'ensemble des espèces végétales sur la zone de mesure représente un travail d'une précision beaucoup plus importante. Cela peut s'approcher en augmentant le nombre de variables étudiées, par exemple les indices LAI ou AGB, que nous n'avons pu exploiter faute d'un nombre de mesures suffisant dans cette étude.

Nous pouvons par ailleurs nous interroger sur la pertinence de notre méthode d'échantillonnage. Si la majorité des points font partie d'une des zones que nous avons pu mettre en évidence, il existe plusieurs couverts végétaux particuliers qui ne présentent aucun point d'échantillonnage. De la même manière, on observe de larges zones sans points d'échantillonnage pour les représenter. Ceci nous laisse à penser qu'il serait judicieux d'ajouter quelques points pour compléter l'échantillonnage de la zone de mesure.

5. Conclusion

Cette étude s'est inscrite dans le cadre du programme ICOS (Integrated Carbon Observation System), au sein de la station de classe associée du Jardin du Lautaret, en périphérie du massif des Ecrins. Dans le cadre de ce programme de suivi des flux atmosphériques de carbone, une tour de mesure de flux a été installée au col du Lautaret. Notre site de mesure a été une prairie, d'une aire totale d'environ 10 hectares, ayant pour centre cette tour à flux.

En s'appuyant sur les protocoles et les méthodes proposées par ICOS Ecosystème, nous avons suivi, tout au long de la saison de croissance 2023, plusieurs variables environnementales tels que le NDVI (Normalized Vegetation Index), LAI (Leaf Area Index) et AGB (Above Ground Biomass). L'objectif initial était de suivre et caractériser, selon ces variables, le fonctionnement de l'écosystème végétal composant la zone de mesure. Ajouté à ces données, nous avons caractérisé la composition en espèces végétales du couvert, grâce à des relevés botaniques sur le terrain, et exploité différentes données satellitaires, multispectrales et hyperspectrales, pour suivre de manière spatio-temporelle l'évolution des variables citées précédemment, mais également du couvert neigeux et de plusieurs indices hyperspectraux de végétations (HVI).

L'analyse conjointe de l'ensemble de ces données nous a permis de caractériser du mieux que possible le fonctionnement du couvert végétal composant la zone de mesure. Plusieurs relations de corrélation ont été mises en évidence entre différentes variables, notamment la topographie, la dynamique de fonte du couvert neigeux et la composition floristique, mais également l'évolution du NDVI et certaines variables météorologiques, entre autres. Nous avons pu produire une carte de répartition des couverts végétaux caractéristiques de la zone de mesure, fruit de l'analyse de chacune des variables de l'étude.

Notre étude nous a permis de caractériser cet écosystème comme une prairie subalpine à fétuque paniculée, présentant de nombreuses micro-variations, comme une importante zone humide ou plusieurs pelouses à dominance particulière, comme les espèces *Vaccinium Myrtillus*, *Nardus Stricta* ou *Veratrum album*.

Le travail de caractérisation d'un écosystème est extrêmement complexe, notamment à cause de l'infinité de processus ayant cours en son sein, et du nombre de variables jouant un rôle plus ou moins grand sur son fonctionnement. Nous avons pu mettre en évidence quelques processus se déroulant dans l'écosystème de la zone de mesure, et commencer à caractériser une partie de son fonctionnement, mais cette étude n'est qu'une approche et ne révèle en rien toute la complexité de cet écosystème. Nous aurions pu doubler voir tripler le nombre de variables étudiées, voir même nous intéresser à d'autres aspects de cet écosystème ayant une influence sur le couvert végétal, tel que l'activité des microorganismes du sol, par exemple. Malgré tout, ceci peut être un bon point de départ et donne déjà quelques clés et indications pour mieux comprendre et appréhender cet écosystème.

Bibliographie

Devant la quantité d'articles et de documents scientifiques consultés au cours de cette étude, cette bibliographie n'est qu'un condensé, non exhaustif, des principaux documents ayant alimenté notre travail.

BAYLE, Arthur, CARLSON, Bradley Z., THIERION, Vincent, ISENMANN, Marc et CHOLER, Philippe, 2019. Improved Mapping of Mountain Shrublands Using the Sentinel-2 Red-Edge Band. *Remote Sensing* [en ligne]. janvier 2019. Vol. 11, n° 23, pp. 2807. DOI [10.3390/rs11232807](https://doi.org/10.3390/rs11232807). Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/23/2807>

CARLSON, Bradley Z., CORONA, Monica C., DENTANT, Cédric, BONET, Richard, THUILLER, Wilfried et CHOLER, Philippe, 2017. Observed long-term greening of alpine vegetation— a case study in the French Alps. *Environmental Research Letters* [en ligne]. octobre 2017. Vol. 12, n° 11, pp. 114006. DOI [10.1088/1748-9326/aa84bd](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa84bd). Disponible à l'adresse : <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa84bd>

CHOLER, P., 2015. Growth response of temperate mountain grasslands to inter-annual variations in snow cover duration. *Biogeosciences* [en ligne]. 26 juin 2015. Vol. 12, n° 12, pp. 3885-3897. DOI [10.5194/bg-12-3885-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-3885-2015). Disponible à l'adresse : <https://bg.copernicus.org/articles/12/3885/2015/>

CHOLER, Philippe, 2023. Above-treeline ecosystems facing drought: lessons from the European 2022 summer heatwave. *Biogeosciences Discussions* [en ligne]. 2 mai 2023. pp. 1-22. DOI [10.5194/bg-2023-74](https://doi.org/10.5194/bg-2023-74). Disponible à l'adresse : <https://bg.copernicus.org/preprints/bg-2023-74/>

CHOLER, Philippe, BAYLE, Arthur, CARLSON, Bradley Z., RANDIN, Christophe, FILIPPA, Gianluca et CREMONESE, Edoardo, 2021. The tempo of greening in the European Alps: Spatial variations on a common theme. *Global Change Biology* [en ligne]. 2021. Vol. 27, n° 21, pp. 5614-5628. DOI [10.1111/gcb.15820](https://doi.org/10.1111/gcb.15820). Disponible à l'adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.15820>

DALLERY, Donatien. Suivi des prairies par mesures hyperspectrales et séries temporelles d'images satellitaires à haute résolution spatiale : influence des modes de gestion sur le signal spectral.

DEDIEU, Jean-Pierre, CARLSON, Bradley Z., BIGOT, Sylvain, SIRGUEY, Pascal, VIONNET, Vincent et CHOLER, Philippe, 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* [en ligne]. juin 2016. Vol. 8, n° 6, pp. 481. DOI [10.3390/rs8060481](https://doi.org/10.3390/rs8060481).

DÖPPER, Veronika, ROCHA, Alby Duarte, BERGER, Katja, GRÄNZIG, Tobias, VERRELST, Jochem, KLEINSCHMIT, Birgit et FÖRSTER, Michael, 2022. Estimating soil moisture content under grassland with hyperspectral data using radiative transfer modelling and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [en ligne]. 1 juin 2022. Vol. 110, pp. 102817. DOI [10.1016/j.jag.2022.102817](https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102817). Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156984322200019X>

Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: a comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize | BMC Ecology | Full Text, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://bmcecol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12898-019-0233-0>

Etude moléculaire de la protection contre le stress (photo)oxydatif par les caroténoïdes, [sans date]. *Agence nationale de la recherche* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://anr.fr/Projet-ANR-06-BLAN-0001>

EVANGELIDES, Christos et NOBAJAS, Alexandre, 2020. Red-Edge Normalised Difference Vegetation Index (NDVI705) from Sentinel-2 imagery to assess post-fire regeneration. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* [en ligne]. 1 janvier 2020. Vol. 17, pp. 100283. DOI [10.1016/j.rsase.2019.100283](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100283). Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938519302320>

FANG, Hongliang, BARET, Frédéric, PLUMMER, Stephen et SCHAEPMAN-STRUB, Gabriela, 2019. An Overview of Global Leaf Area Index (LAI): Methods, Products, Validation, and Applications. *Reviews of Geophysics* [en ligne]. 2019. Vol. 57, n° 3, pp. 739-799. DOI [10.1029/2018RG000608](https://doi.org/10.1029/2018RG000608). Disponible à l'adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018RG000608>

GASCOIN, Simon, GRIZONNET, Manuel, BOUCHET, Marine, SALGUES, Germain et HAGOLLE, Olivier, 2019. Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data* [en ligne]. 16 avril 2019. Vol. 11, n° 2, pp. 493-514. DOI [10.5194/essd-11-493-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-493-2019). Disponible à l'adresse : <https://essd.copernicus.org/articles/11/493/2019/>

GISGEOGRAPHY, 2017. What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)? *GIS Geography* [en ligne]. 9 mai 2017. Disponible à l'adresse : <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>

GOWEN, Aoife, 2014. NIR Hyperspectral Image analysis using R. Part 1: Introduction. *NIR news*. 15 mars 2014. Vol. 25. DOI [10.1255/nim.1428](https://doi.org/10.1255/nim.1428).

ICOS, [sans date]. Instructions_ECO_Ancillary_Grassland. *ICOS nextcloud* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://fileshare.icos-cp.eu/s/DCKoY9Z3r6KzxsY>

ICOS Ecosystem Instructions and Guidelines, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.icos-etc.eu/icos/documents/instructions>

Light Use Efficiency, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/LightUseEfficiency.html>

LOWE, Amy, HARRISON, Nicola et FRENCH, Andrew P., 2017. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods* [en ligne]. 10 octobre 2017. Vol. 13, n° 1, pp. 80. DOI [10.1186/s13007-017-0233-z](https://doi.org/10.1186/s13007-017-0233-z). Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0233-z>

Remote Sensing | Free Full-Text | Climatic Drivers of Greening Trends in the Alps, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/21/2527>

ROBERTS, Dar, ROTH, Keely et PERROY, Ryan, 2011. Hyperspectral Vegetation Indices. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. 25 octobre 2011. pp. 309-327. DOI [10.1201/b11222-20](https://doi.org/10.1201/b11222-20).

SELLAMI, Mohamed Houssemeddine, ALBRIZIO, Rossella, ČOLOVIĆ, Milica, HAMZE, Mohamad, CANTORE, Vito, TODOROVIC, Mladen, PISCITELLI, Lea et STELLACCI, Anna Maria, 2022. Selection of Hyperspectral Vegetation Indices for Monitoring Yield and Physiological Response in Sweet Maize under Different Water and Nitrogen Availability. *Agronomy* [en ligne]. février 2022. Vol. 12, n° 2, pp. 489. DOI [10.3390/agronomy12020489](https://doi.org/10.3390/agronomy12020489). Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/2/489>

Sentinel 2 Bands and Combinations - GIS Geography, [sans date]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://gisgeography.com/sentinel-2-bands-combinations/>

SunScan Canopy Analysis - Canopy Analyser - LAI - PAR, [sans date]. *Delta T* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://delta-t.co.uk/product/sunscan/>

TRIMBLE, Scott, 2020. The Importance of Leaf Area Index (LAI) in Environmental and Crop Research. *CID Bio-Science* [en ligne]. 14 octobre 2020. Disponible à l'adresse : <https://cid-inc.com/blog/the-importance-of-leaf-area-index-in-environmental-and-crop-research/>

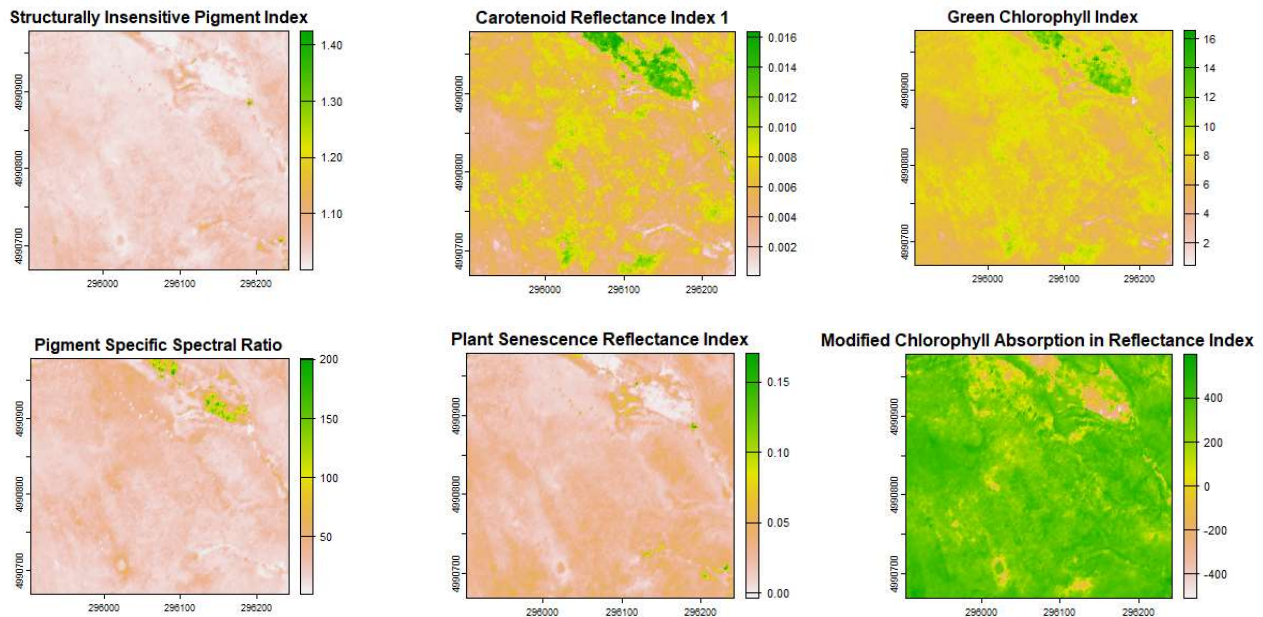
VARPE, Amarsinh B, KALE, Karbhari V, VIBHUTE, Amol D, SURASE, Rupali R et NAGNE, Ajay D, 2018. Analysis of Chlorophyll in Plant Species Leaves using Hyperspectral Remote Sensing Data. 2018.

ZAITOUNI, Mohammed et IBOUH, H., 2016. *Apport de la télédétection dans l'évaluation de la variation des surfaces d'eau, du sol et du couvert végétal dans la Plaine du Tadla entre 1984 et 2015*.

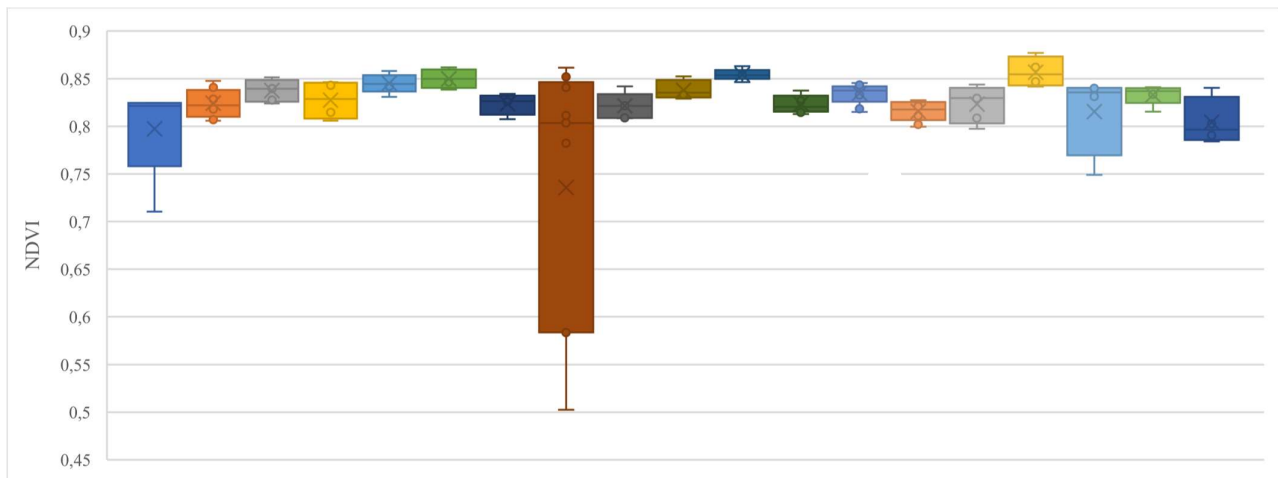
ZHANG, F. et ZHOU, G., 2019. Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: a comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize. *BMC Ecology* [en ligne]. 29 avril 2019. Vol. 19, n° 1, pp. 18. DOI [10.1186/s12898-019-0233-0](https://doi.org/10.1186/s12898-019-0233-0). Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0233-0>

Annexes

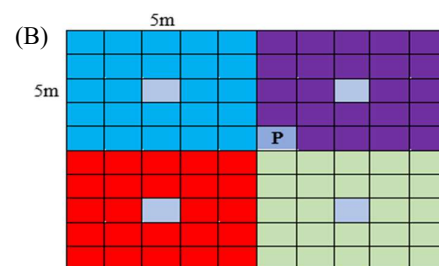
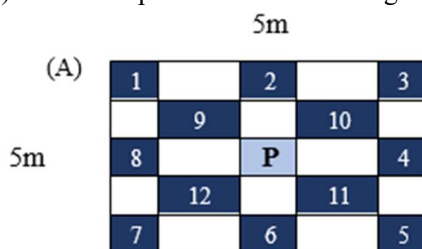
Annexe 1. Carte de différents indices hyperspectraux de végétation calculés sur la zone de mesure.



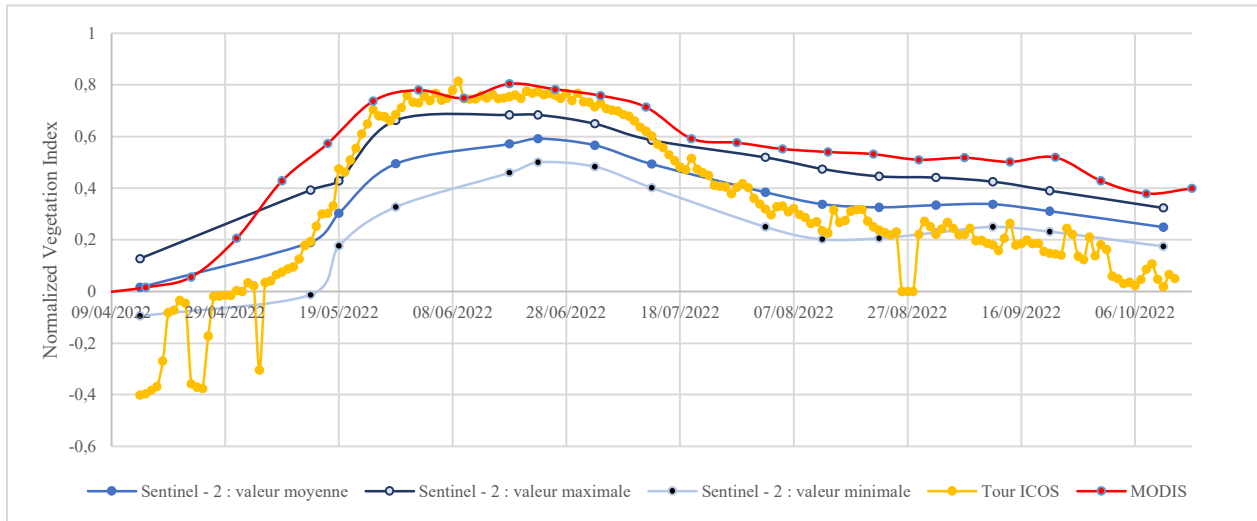
Annexe 2. Etude de l'homogénéité de la valeur de l'indice NDVI dans un rayon de 10 mètres autour de chaque points d'échantillonnage au 27 juin 2023. Les boxplots représentent les 5 (ou plus) valeurs calculées à chaque point d'échantillonnage selon le schéma indiqué en annexe 3-B. Les valeurs sont très semblables, indiquant une homogénéité à deux niveaux : dans un rayon de 10 mètres autour des points, mais également globalement sur toute la zone de mesure.



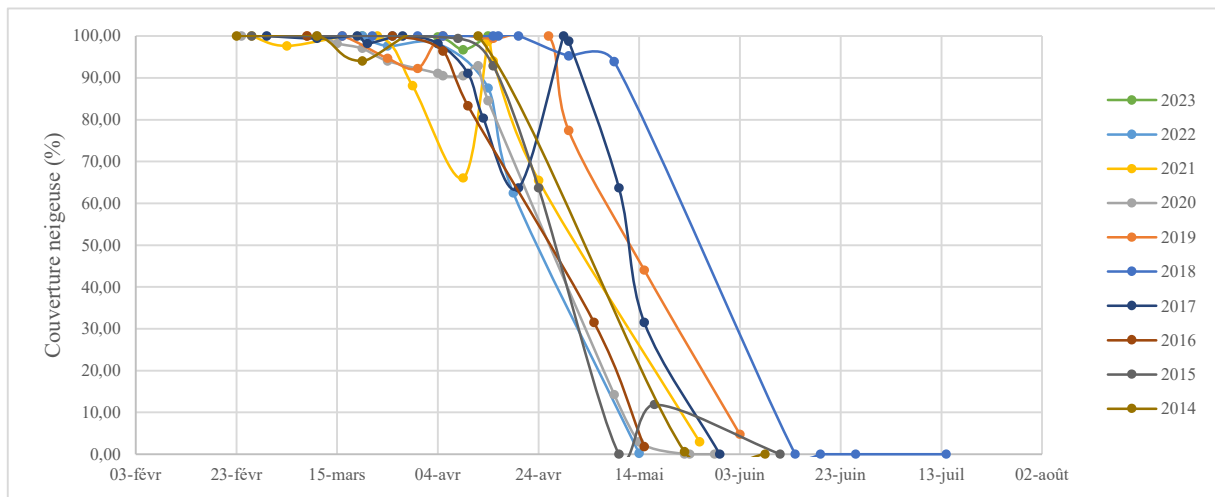
Annexe 3. Schéma d'organisation de l'étude expérimentale d'homogénéité de la valeur du NDVI autour des points d'échantillonnage de la zone de mesure. La lettre P représente le quadrat de mesure utilisé pour les mesures standards, et les carrés bleus foncés (A) et bleus clairs (B) représentent les points où ont été effectuées des mesures de NDVI. Les deux protocoles étudient l'homogénéité sur un rayon de 5 mètres (A) et sur un rayon de 10 mètres (B) autour des points d'échantillonnage.



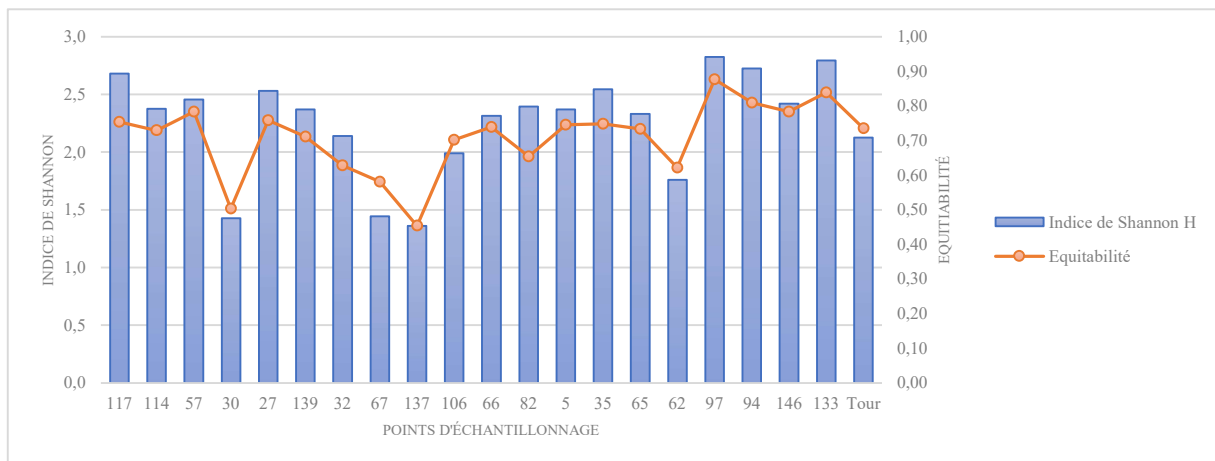
Annexe 4. Comparaison de l'évolution de l'indice NDVI sur la zone de mesure au cours de la saison de croissance 2022 selon différentes sources de données utilisées au cours de l'étude : satellitaires, avec Sentinel – 2 et MODIS, et sur le terrain, avec les données récoltées par la tour à flux ICOS.



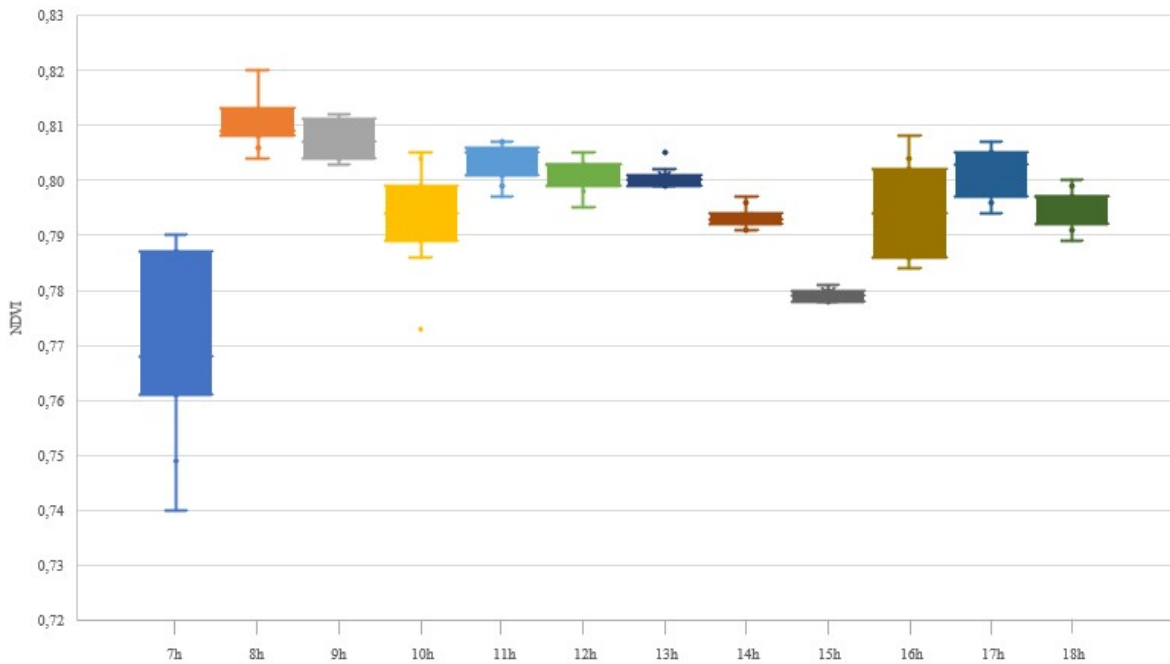
Annexe 5. Comparaison interannuelle de l'évolution de la couverture neigeuse sur la zone de mesure sur la période 2018 – 2023. Les données sont extraites du produit Neige proposé par le pôle THEIA du CNES.



Annexe 6. Indicateurs environnementaux de diversité des espèces végétales sur les points d'échantillonnage de la zone de mesure.



Annexe 7. Etude des variations de l'indice NDVI au cours d'une journée, en un même point et selon des conditions climatiques et d'ensoleillement variables.



Annexe 8. Evolution du couvert neigeux sur la zone de mesure au cours de l'année 2020, selon les données Sentinel – 2. Le traitement a été réalisé avec le logiciel Arcgis.

