

Plan :

Introduction

I) Contexte et état de l'art

- I) 1) Le rôle des prairies pour l'atténuation du changement climatique
 - I) 1) a) Les écosystèmes dans le cycle du carbone
 - I) 1) b) Les prairies : des puits de carbone vulnérables ?
- I) 2) Comment déterminer les échanges de carbone d'un écosystème ?
 - I) 2) a) Mesurer les flux de CO₂ à différentes échelles
 - I) 2) b) Transport du CO₂ dans l'atmosphère : notions de micro-météorologie
- I) 3) Dispositif et structure d'accueil
 - I) 3) a) Le réseau ICOS
 - I) 3) b) L'Institut des Géosciences de l'Environnement

II) Matériel et méthodes

- II) 1) Le site étudié
 - II) 1) a) Caractéristiques de la zone
 - II) 1) b) Instrumentation du site
- II) 2) Détermination de l'origine des flux de CO₂
 - II) 2) a) Météorologie et saisonnalité
 - II) 2) b) Mesure des flux turbulents par *eddy covariance*
 - II) 2) c) Modèle de prédiction de l'empreinte de flux (FFP)

III) Résultats

- III) 1) Dynamiques saisonnières du climat et de la végétation
- III) 2) Estimation des zones sources de CO₂

Introduction :

Depuis plus de 30 ans, les rapports du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) mettent en lumière un réchauffement global, qui devrait atteindre +1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle d'ici à 2030 (Ministère de l'écologie, 2023). Que ce soit sur les populations ou les écosystèmes, les conséquences de ce bouleversement sont déjà visibles et croissent de manière substantielle : cela se traduit notamment par une augmentation en fréquence et en intensité des aléas météorologiques comme les sécheresses. L'augmentation du dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique dans l'atmosphère explique en grande partie ce dérèglement climatique sans précédent. Afin de limiter les impacts négatifs de ce phénomène, un seuil de 2°C d'augmentation des températures a été fixé par l'Accord de Paris, premier traité international pour le climat. Pour respecter cet objectif, la France a mis en place une stratégie de réduction des GES jusqu'à atteindre la neutralité carbone en 2050, au travers du Pacte Vert pour l'Europe et de la Stratégie Nationale Bas Carbone. Agissant comme des puits de carbone naturels, les écosystèmes terrestres séquestrent actuellement l'équivalent d'un tiers des émissions dues aux activités humaines (Friedlingstein et al., 2025) et représentent donc un levier majeur pour l'atténuation du changement climatique. Plus particulièrement, les prairies constituent un puits net de 300 kg C ha⁻¹ an⁻¹ (Dondini et al., 2023). Dans l'arc alpin français, les zones pastorales occupent 11 833 km² (Agence nationale de la cohésion des territoires, 2022), ce qui souligne l'importance du stock de carbone potentiel de ces territoires. Cependant, les Alpes étant singulièrement affectées par la hausse des températures (fonte des glaciers, réduction de l'enneigement), les alpages sont vulnérables et leur pérennité à long terme pourrait être remise en cause. De ce fait, il est essentiel de mieux comprendre les mécanismes de séquestration du carbone des prairies alpines pour pouvoir prédire leur comportement futur et leur sensibilité face au dérèglement climatique.

Afin de mesurer les échanges de GES, d'eau et d'énergie notamment entre les écosystèmes et l'atmosphère, le réseau européen *Integrated Carbon Observation System* (ICOS) a été mis en place. Cette infrastructure de recherche européenne compte 16 pays membres et plus de 170 stations de mesure sur les écosystèmes. Les données recueillies, standardisées à l'échelle du réseau, permettent de suivre en temps réel et avec plus de fiabilité les évolutions des flux d'eau et de CO₂ et d'étudier leurs interactions avec les variables météorologiques. Dans ce contexte, l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), laboratoire de recherche sur le climat, l'anthropisation et les risques environnementaux notamment dans les zones de montagne, supervise la tour à flux ICOS au col du Lautaret (Hautes-Alpes). Le dispositif, situé au-dessus d'un système prairial alpin extensif, fournit des informations clefs sur les échanges de CO₂ et de vapeur d'eau entre l'écosystème et l'atmosphère.

La surface de mesure est caractérisée par la présence de diverses espèces végétales réparties en plusieurs aires de dominance, d'une zone humide et de reliefs topographiques particuliers. Or, l'hétérogénéité de la surface étudiée (occupations du sol diverses, variations locales de rugosité, d'humidité ou de température) influence les flux dans l'atmosphère en contact avec la surface de la Terre. Cela complexifie l'interprétation des données et la détermination de l'origine des GES. Le partitionnement du flux net entre la fixation par photosynthèse et la respiration de l'écosystème est également une problématique pour la compréhension des échanges de CO₂.

Par conséquent, se pose la question suivante : **dans quelle mesure les données acquises par l'installation ICOS sont-elles représentatives des différents éléments et des flux de CO₂ qui composent le paysage ?** Pour répondre à cette problématique, les objectifs principaux de l'étude sont :

- Caractériser l'origine des flux mesurés par la tour,
- Déterminer la représentativité de la respiration de l'écosystème calculée (par comparaison avec des données mesurées).

I) Contexte et état de l'art :

I) 1) Le rôle des prairies pour l'atténuation du changement climatique

I) 1) a) Les écosystèmes dans le cycle du carbone

A l'échelle de la planète, le carbone circule rapidement entre trois principaux réservoirs : l'atmosphère, les océans et la biosphère terrestre. A ce cycle court, se rajoutent de grandes quantités de carbone au temps de résidence plus long, qui sont stockées sous forme de sédiments ou de roches, dans les océans profonds et sous terre (voir Figure X).

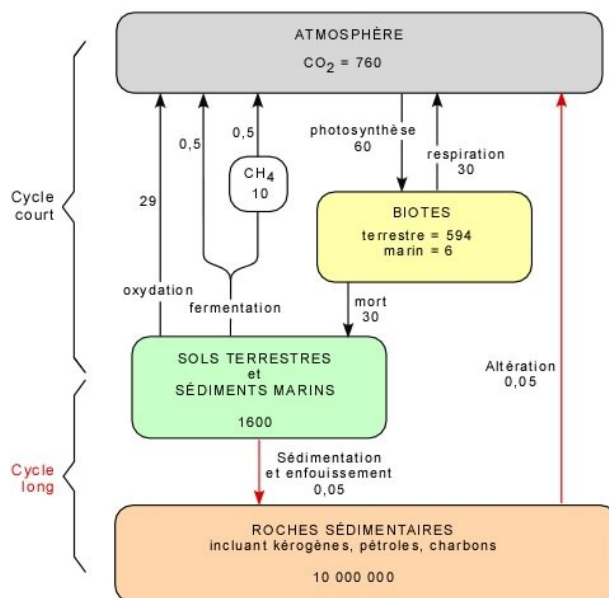


Figure X : Représentation du cycle global du carbone organique (valeurs en gigatonnes de carbone) d'après Kump et al., 1999

Le CO_2 joue un rôle majeur dans le cycle du carbone en participant aux flux entrants et sortants entre les écosystèmes et l'atmosphère. En effet, une part importante de CO_2 est relâchée par la dégradation de la matière organique du sol et par la respiration des micro-organismes, des animaux et des végétaux. Ce carbone atmosphérique est fixé par les plantes pour leur croissance lors de la photosynthèse. La biomasse aérienne et racinaire ainsi créée peut par la suite être consommée par les organismes terrestres et restituée au sol. Cependant, le stockage pérenne dans le sol représentant moins de 10 % du carbone fixé par photosynthèse (Gac et al. 2010), la majeure partie du flux est contrôlée par le couple photosynthèse/respiration.

Cet équilibre naturel est bouleversé par les activités humaines, l'utilisation d'énergies fossiles et le changement d'utilisation des terres émettant respectivement $9,7 \pm 0,5$ et $1,1 \pm 0,7$ Gt C/an (Friedlingstein et al., 2025). Les écosystèmes terrestres constituent des puits potentiels, puisqu'ils ont fixé en moyenne 3,2 Gt C/an sur la période 2014-2023 (Friedlingstein et al., 2025). De plus, l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique accroît en théorie la capacité des végétaux à fixer le carbone par photosynthèse. Sans facteurs limitants, cela devrait donc induire une augmentation de leur fonction de puits (Ainsworth & Long, 2005). Cependant, les dynamiques du carbone sont particulièrement dépendantes des conditions climatiques (température et précipitations) et les émissions anthropiques entraînent un dérèglement climatique global. A l'échelle des écosystèmes, l'augmentation des températures accélère la dégradation de la matière organique par les micro-organismes et altère le fonctionnement normal des plantes en réduisant la photosynthèse (Ramonet M et al. 2020, Ciais et al, 2005). Les voies de limitation de l'effet de serre

concernent ainsi l'augmentation du stockage de carbone et la protection des écosystèmes puits que sont les forêts, les tourbières ou encore les prairies.

I) 1) b) Les prairies : des puits de carbone vulnérables ?

A l'échelle du globe, les prairies couvrent 25 % de la superficie terrestre (FAO, 2024). Elles peuvent être définies comme des « écosystèmes terrestres dominés par une végétation herbacée et arbustive et maintenus par le feu, le pâturage, la sécheresse et/ou le froid » (White et al., 2000). Dans le cas plus particulier des prairies d'altitude, les températures basses et la faible profondeur des sols entravent l'évolution de l'écosystème vers un stade forestier. Les prairies apportent de nombreux services écosystémiques, que ce soit en contribuant à limiter l'érosion des sols, en entretenant la biodiversité ou en générant des produits agricoles (pâturage et fauche). Elles ont également une fonction de stockage de carbone, qui peut être plus ou moins importante selon les pratiques de gestion (Peyraud et al., 2012).

Les ruminants influencent le déroulement du cycle du carbone dans les écosystèmes prairiaux. En effet, en coupant les feuilles, les animaux réduisent la surface foliaire de l'herbe et donc sa capacité à absorber du CO_2 (Rogiers et al., 2005). La majeure partie du carbone ingéré par les herbivores est digérée et donc respirée rapidement, la fraction non digestible restante étant retournée à la parcelle sous forme de déjections (voir Figure X). De ce fait, le pâturage module les entrées de matières organiques et la dégradation de celles-ci. Par ailleurs, la séquestration du carbone survient lorsque la fixation par photosynthèse (GPP : *Gross Primary Production*, production primaire brute) excède la respiration des micro-organismes, des plantes et des ruminants (Reco : *Respiration de l'Ecosystème*). Ainsi, de la même manière que les forêts, les prairies peuvent stocker jusqu'à 70 tonnes de carbone par hectare sur l'horizon de sol 0-30 cm (Gac et al., 2010). Une pelouse d'altitude stocke quant à elle 93 t C/ha (Arrouays et al., 2002), la différence étant principalement due à l'effet des faibles températures sur la minéralisation du carbone.

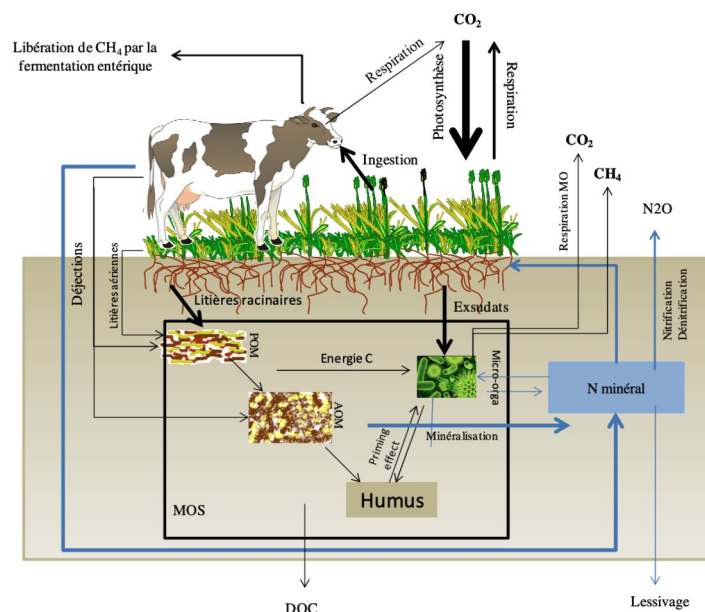


Figure X : Représentation des flux (C et N) entre les herbivores, le couvert végétal, les matières organiques du sol et les micro-organismes en prairies permanentes (d'après Herfurth, 2015)

MO : Matière Organique, POM : Matière Organique Particulaire, AOM : Matière Organique Active, MOS : Matière Organique du Sol, DOC : Carbone Organique Dissous

Cependant, les alpages, caractérisés par les services écosystémiques qu'ils apportent et leur diversité végétale, sont particulièrement menacés par le changement climatique. Les interactions

complexes entre le climat et la topographie au sein des milieux alpins entraînent une hétérogénéité environnementale expliquant la richesse et l'endémisme de ces écosystèmes (Verrall et Pickering, 2020). En effet, ils sont dépendants de paramètres climatiques strictes, notamment les basses températures et la période d'enneigement. Face au changement climatique, ces habitats sont donc très vulnérables avec des conséquences non négligeables sur la taille des glaciers ou encore le ratio neige/pluie (Huss et al., 2017), d'autant plus que le réchauffement est plus rapide à haute altitude (Pepin et al., 2015). Alors que les températures augmentent, des changements sont déjà visibles sur les communautés biotiques, qui transitionnent progressivement vers des espèces plus adaptées aux conditions chaudes (Gottfried et al., 2012). Ces modifications du climat et par extension du fonctionnement de l'écosystème ont un effet direct sur la fonction de puits des alpages (Reichstein et al., 2013). De fait, en période de sécheresse ou de canicule, l'écosystème peut déstocker temporairement (Nagy et al., 2007). Néanmoins, pour plusieurs localités dans les Alpes, la fonte de neige plus précoce augmente la durée de la période de croissance des plantes, et donc potentiellement l'assimilation de carbone (Rogger et al., 2022). De plus, la résilience de la prairie alpine face aux fluctuations du climat pourrait permettre un certain amortissement de la variabilité interannuelle du bilan carbone (Marcolla et al., 2011).

Alors que les écosystèmes jouent un rôle important dans le cycle du carbone et par extension la mitigation du changement climatique, il s'avère indispensable de connaître plus précisément leur aptitude à stocker du CO₂. L'enjeu est d'autant plus fort pour les prairies alpines, dont le fonctionnement est sensible au dérèglement du climat. Afin de quantifier ces échanges de carbone entre l'écosystème et l'atmosphère, des méthodes de mesure existent à plusieurs échelles, de l'organisme au paysage.

I) 2) Comment déterminer les échanges de carbone d'un écosystème ?

I) 2) a) Mesurer les flux de CO₂ à différentes échelles

La mesure des flux de CO₂ à différentes échelles spatiales et temporelles permet de mieux comprendre les facteurs physiques et biologiques intervenant dans le cycle du carbone, notamment en montagne. En effet, les plantes et les communautés microbiennes du sol qui constituent l'écosystème réagissent de manière différente aux conditions environnementales que sont la température, l'humidité et l'exposition lumineuse. Or, les prairies alpines sont caractérisées par de fortes dynamiques saisonnières (Bonfanti et al., 2025), expliquées par une longue période d'enneigement. L'hétérogénéité de la topographie sur les pentes entraîne également des micro-variations du milieu. Ces particularités propres aux zones montagneuses sont à l'origine d'une forte diversité au sein des communautés végétales (Malanson et al., 2024), ce qui complexifie la compréhension des interactions écosystème-atmosphère.

Les méthodes traditionnelles d'évaluation de l'échange de carbone d'un écosystème reposent sur l'observation individuelle de ses composantes en conditions contrôlées. A l'échelle de la feuille, l'assimilation nette peut être mesurée à l'aide d'un poromètre (Moureaux et al., 2008). L'activité des microorganismes du sol (respiration hétérotrophe) est quant à elle déterminée par incubation d'échantillons en laboratoire. Afin d'observer les flux au sein de micro-parcelles, il est possible de mettre en place des chambres closes permettant le suivi de la concentration de CO₂ (Li et al., 2008). Ces observations étant ponctuelles, elles nécessitent par la suite une extrapolation avec des modèles de réponse environnementale. Toutefois, ces méthodes nécessitant de la main d'œuvre et du temps, elles sont généralement mises en place en nombre limité et à des positions fixes. Cela produit des biais et des artefacts expérimentaux et ne permet pas de capturer toute la variabilité spatiale des flux (Baldocchi et al., 2003). Ces inconvénients sont particulièrement limitants en situation de forte diversité, comme c'est le cas pour les alpages.

A l'échelle de l'écosystème dans son intégralité, l'utilisation de méthodes plus globales comme l'*eddy covariance* (covariance des turbulences) permet d'élargir la gamme de temps, de conditions mais aussi l'aire couverts par les instruments. Reposant sur des théories micro-météorologiques, l'*eddy covariance* est avant tout applicable sur terrain plat et homogène ce qui limite son utilisation en montagne (Li et al., 2008). Utilisée sur des prairies alpines, cette technique a cependant révélé des tendances similaires à celles obtenues en chambres closes (Bonfanti et al., 2025 ; Vivlado et al., 2023). Elle s'est généralisée, permettant le suivi en continu des flux de CO₂ et la mise en place de réseaux globaux comme Ameriflux ou ICOS.

I) 2) b) Transport du CO₂ dans l'atmosphère : notions de micro-météorologie

La couche limite de l'atmosphère est définie comme « la partie de la troposphère qui est directement influencée par la présence de la surface de la terre, et qui répond aux forçages de surface en une heure ou moins » (Stull, 1988). Son épaisseur (**h**) varie dans le temps et l'espace en fonction de facteurs géographiques et climatiques, pouvant s'étendre de plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres. Au sein de cette couche, des échanges constants d'énergie, de chaleur et de vapeur d'eau avec la surface donnent lieu à des mouvements verticaux et horizontaux d'air. La micro-météorologie se consacre à l'étude de ces phénomènes atmosphériques à petite échelle.

Dans l'atmosphère de surface, le vent résulte de l'équilibre entre les forces de pression, les forces de frottement et la stratification thermique de l'air (Couillet, 2002). Il est particulièrement influencé par les reliefs, le cycle diurne, les conditions météorologiques et la nature du sol. En un point de l'espace, la vitesse du vent présente donc de fortes variations au cours du temps, aux amplitudes et fréquences différentes (voir Figure X).

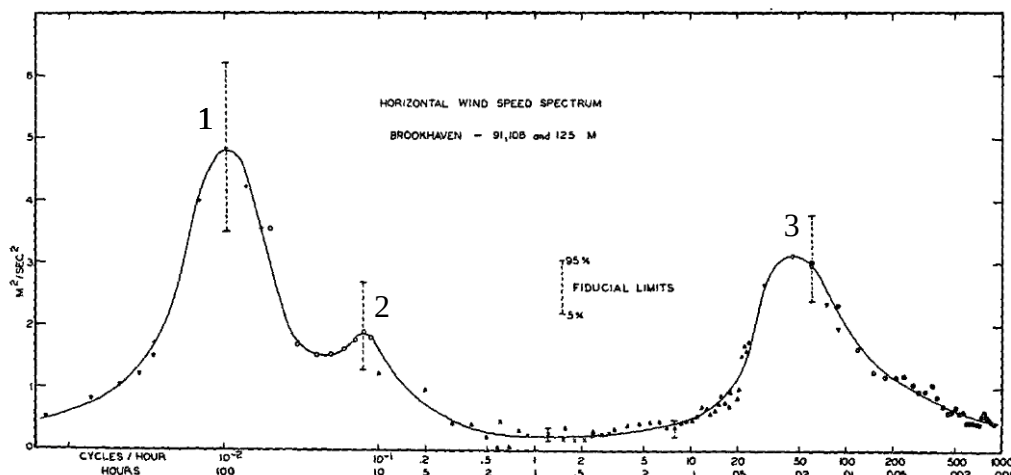


Figure X : Analyse spectrale de la vitesse du vent dans la couche limite turbulente, représentative d'un vent horizontal à 100 m du sol (Van der Hoven, 1957)

Les mouvements à grandes échelles ont une taille supérieure à la centaine de kilomètres et témoignent des variations saisonnières, des perturbations régionales synoptiques comme les anticyclones (pic 1) ou du cycle diurne (pic 2, avec une période d'environ 12 h). Les mouvements à micro-échelles mesurent moins d'un kilomètre, avec une fréquence comprise entre 10 s et 10 min (pic 3). A cette échelle, l'écoulement de l'air est turbulent, constitué d'une multitude de tourbillons de différentes tailles, qui se superposent et s'entretiennent. Cette turbulence atmosphérique a deux origines :

- Thermique : due aux gradients de température dans l'atmosphère. En effet, les rayons du soleil chauffent le sol, qui transfère la chaleur au volume d'air adjacent. Alors que la température augmente, la densité diminue et l'air monte : c'est ce qu'on appelle la flottabilité (Lange & Focken, 2006).

- Mécanique : générée par la rugosité des éléments et obstacles de la surface et quantifiée par la vitesse de friction u^* .

Le degré de stabilité de l'atmosphère (stable, neutre ou instable) dépend de l'importance relative de la turbulence thermique et de la turbulence mécanique. Il est qualifié par des grandeurs comme la longueur de Monin-Obukhov L_{MO} (Monin & Obukhov, 1954). Par ailleurs, les écart-types des fluctuations de la vitesse du vent σ permettent aussi d'avoir un aperçu sur l'agitation de l'air dans toutes les directions.

Le CO_2 émis par les processus de respiration et de photosynthèse de l'écosystème est immédiatement soumis aux caractéristiques de la couche limite atmosphérique. Une fois générées à la surface, les molécules sont advectées horizontalement par le vent moyen u_{mean} et dispersées verticalement et transversalement par la turbulence. Ainsi, la compréhension des écoulements atmosphériques et de la dispersion du CO_2 à l'échelle d'un paysage hétérogène est essentielle pour quantifier les échanges atmosphère/écosystème.

Ainsi, parmi les méthodes de mesure des flux de CO_2 , les techniques atmosphériques comme l'*eddy covariance* permettent de capter les échanges à l'échelle d'un écosystème. Elles reposent sur les propriétés de la couche limite, notamment les turbulences qui sont les principaux vecteurs du transport des molécules. Cependant, ces méthodes posent des limites pour l'interprétation des flux mesurés dans des milieux complexes et diversifiés.

I) 3) Dispositif et structure d'accueil

I) 3) a) Le réseau ICOS

Le réseau européen ICOS est un ensemble de plus de 170 stations de mesure des concentrations et flux des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 ou N_2O), qui opère à trois niveaux : les océans, l'atmosphère et les écosystèmes. Fondée en 2008, la structure a pour objectif de produire des données standardisées sur le long terme, afin de comprendre le cycle du carbone et le dérèglement climatique. Grâce à la normalisation du réseau, les sources et les puits de carbone anthropiques et naturels sont connus avec plus de précision à l'échelle de l'Europe. Ces informations sont essentielles pour la recherche, mais aussi pour les prises de décision gouvernementales et intergouvernementales en lien avec des traités d'atténuation du changement climatique comme l'Accord de Paris.

Les stations ICOS dédiées à l'observation des écosystèmes sont généralement constituées d'une tour instrumentée au-dessus d'un type de végétation particulier (prairies, forêts ou cultures). Selon l'exigence du cahier des charges (protocoles d'acquisition et variables obligatoires), les sites sont divisés en trois classes : 1, 2 et associée. Les données brutes sont traitées et contrôlées de manière centralisée par le Centre Thématique Ecosystème et publiées sur le Portail Carbone (<https://data.icos-cp.eu/portal/>).

En France métropolitaine, le réseau a été fondé par le Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives (CEA), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE). Il comprend 15 stations écosystèmes, dont 5 sur prairies (voir Figure X).



Figure X : Carte des stations ICOS écosystèmes (d'après ICOS, 2025)

I) 3) b) L'Institut des Géosciences de l'Environnement

L'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) est l'un des principaux laboratoires de l'Observatoire des Sciences de l'Université de Grenoble. Unité mixte de recherche sous la tutelle du CNRS, de l'Université Grenoble Alpes, de l'INRAe, de l'IRD et de Grenoble INP, ses principales thématiques scientifiques sont le climat, le cycle de l'eau, la cryosphère et les environnements naturels et anthropisés. Fort de 330 personnes dont 190 membres permanents, l'IGE est organisé en 9 équipes de recherche et 3 services support. Ses travaux se concentrent plus spécifiquement sur les régions polaires, intertropicales ou de montagne. Au sein de ce laboratoire, l'équipe CHimie Atmosphérique, Neige, Transferts et Impacts (CHIANTI) se focalise sur l'identification des sources et des puits de gaz et de particules générées par les activités humaines et les processus naturels. Elle se concentre également sur l'impact de ces molécules sur le climat, la composition de l'atmosphère, la qualité de l'air et les écosystèmes. L'IGE supervise une station associée ICOS sur une prairie alpine, qui fait partie des installations de recherche du Jardin du Lautaret, situé au Col du Lautaret (Hautes-Alpes).

II) Matériel et méthodes

II) 1) Le site étudié

II) 1) a) Caractéristiques de la zone

La station du Col du Lautaret (code ICOS : FR-ClT) est située à environ 800 mètres au Nord du col, sur le replat des Charmasses (45.0414 N, 6.41053 E). Localisée à environ 2050 mètres d'altitude, la zone d'étude est caractérisée par une prairie alpine extensive, constituée majoritairement d'espèces conservatrices : la Fétuque paniculée (*Festuca paniculata* (L.) Schinz and Thell.), le Cerfeuil des Alpes (*Meum athamanticum* Jacq.), la Fétuque rouge (*Festuca rubra* L.), ou encore la Laïche (*Carex sempervirens* Vill.). Cette dernière est pâturée par des bovins en intersaison et une partie est fauchée pour le foin début juillet. Alors que la plupart du cortège végétal est typique des pâtures d'altitude des Alpes, il existe aussi sur la zone plusieurs micro-écosystèmes liés à une topographie variable (combes à neige) et au réseau hydrologique. Le paysage inclut par ailleurs une diversité géologique riche (massif cristallin, roches sédimentaires et sol d'une profondeur allant de 10 cm à 1,6 m). Au Nord-Est de la station de mesure se situe une zone humide

drainant les eaux provenant des crêtes en amont et de la fonte des neiges. Le bassin versant correspondant, d’une surface de 15,28 ha, alimente la Guisane par un exutoire artificiel créé sous la Galerie de la Marionnaise (voir Figure X).

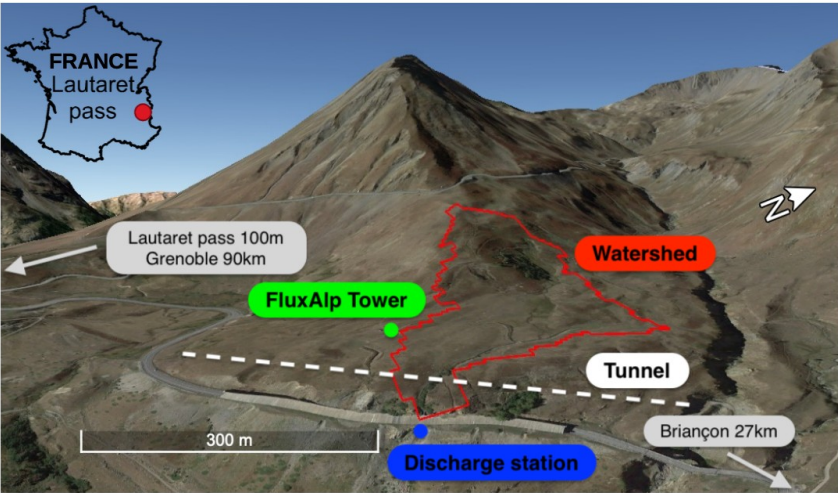


Figure X : Localisation de la station ICOS du Lautaret et du bassin versant des Charmasses (Gupta, 2022)

Avec une température moyenne annuelle de 4,6 °C et un cumul de précipitations moyen de 1531 mm (dont 678 mm de neige), le Col du Lautaret est caractérisé par un climat subarctique (Beck et al., 2018). L’hiver se distingue par une forte couverture neigeuse persistant 5 à 6 mois. Lors de la période estivale (juin à août), les températures moyennes mensuelles peuvent dépasser 14°C et le sol atteint un minimum d’humidité. Cette influence méditerranéenne est due à la situation du col, qui marque la frontière entre les Alpes du Nord et les Alpes du Sud.

II) 1) b) Instrumentation du site

La station de mesure du Lautaret étant associée au réseau ICOS, la collecte de données doit suivre une procédure standardisée et une liste de variables obligatoires (voir Tableau X). Les données relatives au vent et aux flux sont acquises à une fréquence d’échantillonnage de 20 Hz et une durée d’intégration de 30 minutes. Le reste des variables météorologiques sont collectées toutes les demi heures. Dans le cadre du programme ICOS, des informations plus ponctuelles sont aussi relevées (texture du sol, biomasse maximale, informations sur les perturbations et les pratiques de gestion sur le site).

Tableau X : Paramètres mesurés par la station du Col du Lautaret nécessaires à l’étude des flux de CO₂ et capteurs correspondants

Description de la variable	Unité	Capteur correspondant
Variables de flux de GES		
Fraction molaire du CO ₂ dans l'air humide/sec	μmol CO2 mol-1	Analyseur de gaz LI-COR LI-7210 + sonde à CO2 Vaisala GMP343
Flux turbulent de CO ₂	μmolCO2 m-2 s-1	
Vapeur d'eau dans la fraction molaire d'air humide/sec	mmol H2O mol-1	
Variables météorologique relatives au vent et au flux		
Vitesse du vent u_{mean} et vitesse max	m s-1	Anémomètre 3D Gill HS-50 + anémomètre WS-Vector A100
Direction du vent	°	

Ecart-type des fluctuations de vitesse latérale, verticale et dans le sens du vent (σ_v , σ_w , σ_u)	m s-1	Anémomètre 3D Gill HS-50
Vitesse de friction u*	m s-1	
Longueur de Monin-Obukhov L _{MO}	m	
Variables météorologiques de radiation		
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	Sans dimension	Radiomètre 2 longueurs d'onde Skye Instruments SKR 1800
Variables météorologiques atmosphériques		
Température de l'air	°C	Capteur de température et d'humidité relative Campbell Sci. CS215
Humidité relative	%	
Pression atmosphérique	kPa	Baromètre Setra CS100
Variables météorologiques de précipitation		
Précipitations (pluies et chutes de neige)	mm	Pluviomètre de pesée PREC-OTT Pluvio2
Profondeur de neige	m	Capteur à ultrason Campbell Sci. SR50A
Variables météorologiques de sol		
Teneur en eau du sol	%	Campbell Sci. CS650
Température du sol	°C	Campbell Sci. T107

II) 2) Détermination de l'origine des flux de CO₂

L'intégralité du traitement de données a été réalisée en langage Python. Les scripts sont disponibles sur Github à l'adresse suivante : [ajouter lien](#). Ce stage de recherche a bénéficié de l'accompagnement numérique de l'IGE, dans le cadre de l'initiative **OpenReproLab**. Ce programme comprend des sessions de formation hebdomadaires portant sur des pratiques de développement de code et de gestion de données favorisant une meilleure reproductibilité des résultats, dans une optique d'intégration à la dynamique de la science ouverte.

II) 2) a) Météorologie et saisonnalité

Les dynamiques saisonnières du site sont déterminées à partir des variables météorologiques acquises par la station du Lautaret de 2019 à 2023. Les données de température et de profondeur de neige sont d'abord moyennées par jour et par an, puis par jour (numéro) de l'année. Une opération similaire est réalisée pour les flux de CO₂ (voir II) 2) b) Mesure des flux turbulents par *eddy covariance*). Afin de caractériser les vents dominants pour chaque mois, des roses des vents sont tracées en utilisant la librairie *windrose*. Leur format circulaire montre la direction depuis laquelle les vents ont soufflé et la longueur de chaque barre représente la fréquence.

Le fonctionnement global de l'écosystème est d'autre part déterminé par décomposition saisonnière du flux de CO₂ via la fonction *statsmodels.tsa.seasonal.seasonal_decompose*. De plus, l'indice de végétation normalisé (NDVI) permet d'évaluer la quantité de végétation et est construit à partir des canaux rouge (R) et proche infra-rouge (PIR) du radiomètre selon la relation suivante :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Après un ré-échantillonnage par jour (médiane quotidienne), les valeurs de NDVI sont lissées à l'aide d'une médiane glissante centrée sur 20 jours et une moyenne glissante centrée sur 30 jours. Pour finir, les différentes phases de la tendance saisonnière du NDVI sont distinguées en « Croissance », « Stagnation » et « Sénescence » à l'aide de la dérivée (pente).

II) 2) b) Mesure des flux turbulents par *eddy covariance*

La méthode d'*eddy covariance* (EC) permet de mesurer les flux d'un scalaire (H_2O , CO_2 ou autres GES) en caractérisant la turbulence atmosphérique, qui est le mécanisme de transport dominant dans la couche limite. En pratique, cette technique repose sur une analyse statistique du flux, utilisant la décomposition de Reynolds (Figure X). Ainsi, chaque variable dépendante du temps peut être dissociée entre sa moyenne et ses fluctuations.

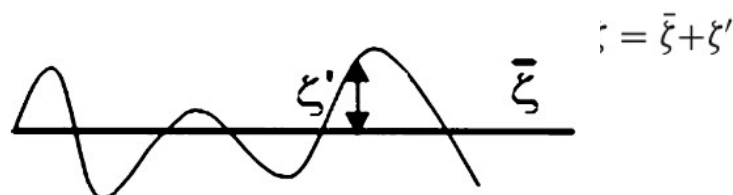


Figure X : Présentation schématique de la décomposition de Reynolds (d'après Foken, 2008)

Cette opération permet d'exprimer la densité moyenne du flux de CO_2 sur une période donnée comme la covariance entre les fluctuations de la vitesse verticale et la fraction molaire du CO_2 dans l'air ((Baldocchi et al., 2003) :

$$F = \overline{\rho_a \cdot w' c'}$$

Avec F le flux turbulent de CO_2 (en $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$)

ρ_a la densité de l'air (en $g\ m^{-3}$)

w la vitesse du vent vertical (en $m\ s^{-1}$)

c la fraction molaire du CO_2 dans l'air (en $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$)

En capturant les composantes 3 dimensions du vent grâce à un anémomètre sonique et la concentration de CO_2 grâce à un analyseur de gaz infrarouge, il est donc possible de connaître les échanges nets de CO_2 , que ce soit par respiration ($F > 0$) ou par fixation ($F < 0$). Les données brutes mesurées par la tour sont traitées par le logiciel EddyPro (LI-COR Environmental) afin d'obtenir des flux demi-horaires. Néanmoins, l'EC repose sur plusieurs hypothèses fondamentales, dont l'homogénéité horizontale du terrain et la stationnarité des conditions atmosphériques (Foken et al., 2012).

II) 2) c) Modèle de prédiction de l'empreinte de flux (FFP)

Lorsque la zone de mesure ne présente pas l'homogénéité idéale pour l'interprétation des flux mesurés par EC, une estimation des aires et de la force des sources est nécessaire. L'empreinte de flux est définie comme « la contribution, par unité d'émission, d'une source de surface au flux scalaire vertical mesuré à une hauteur donnée » (Horst & Weil, 1992). Les modèles d'empreinte de flux sont utilisés pour déterminer l'étendue spatiale et la position des zones qui contribuent aux mesures de flux turbulents à un point d'une hauteur de mesure z_m spécifique. La paramétrisation FFP (*Flux Footprint Prediction*) de Kljun et al. permet ainsi de retracer l'origine des flux pour des

grands jeux de données et dans une large gamme de conditions (convective à stable), de rugosité de surface et de hauteur de mesure (Kljun et al, 2015). Cette fonction découle du modèle Lagrangien stochastique LPDM-B (Kljun et al., 2002) et permet de calculer les empreintes de flux selon deux composantes de l'espace x et y grâce à l'équation suivante :

$$f(x,y) = F^y(x) D_y$$

avec $f(x,y)$ l'empreinte de flux
 F^y l'empreinte intégrée au vent latéral
 D_y la fonction de dispersion au vent latéral

La fonction FFP est disponible sous la forme de modules Python qui permettent d'obtenir des empreintes de flux individuelles (« *calc_footprint_FFP* ») ou des climatologies (« *calc_footprint_FFP_climatology* ») à partir de données acquises par *eddy covariance* (voir Figure X). Les climatologies sont obtenues en agrégeant les empreintes simples par le biais d'une normalisation et d'un lissage (double convolution spatiale selon une distribution Gaussienne). Pour finir, le modèle offre comme données de sortie une visualisation spatiale des valeurs d'empreinte à un domaine et une résolution donnés.

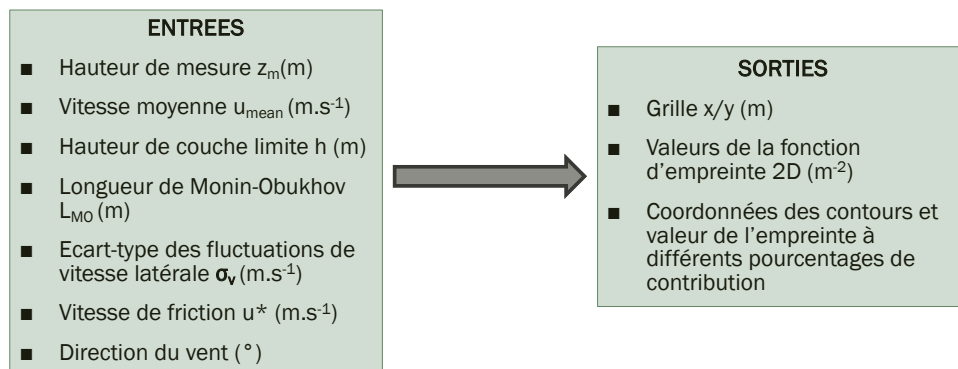


Figure X : Entrées et sorties de la paramétrisation 2D *Flux Footprint Prediction* (Kljun et al., 2015)

III) Résultats :

III) 1) Dynamiques saisonnières du climat et de la végétation

Le cycle moyen annuel du site du Lautaret est typique du climat subarctique, avec des saisons d'été et d'hiver très marquées (voir Figure X). De novembre à mars, les températures moyennes sont négatives ou proches de 0. Durant cette période, le manteau neigeux peut dépasser les 80 cm : comme il n'y a pas de végétation et que la minéralisation est ralentie mais pas stoppée, la prairie agit comme une source de carbone (cumul mensuel positif). Puis en mai, la neige fond entièrement, permettant à la végétation de croître. L'écosystème va fortement fixer du carbone durant les mois de juin et juillet, au pic de biomasse. La saison estivale reste fraîche, avec des températures moyennes comprises entre 11 et 14°C, mais le flux de CO₂ redevient positif dès le mois d'août.

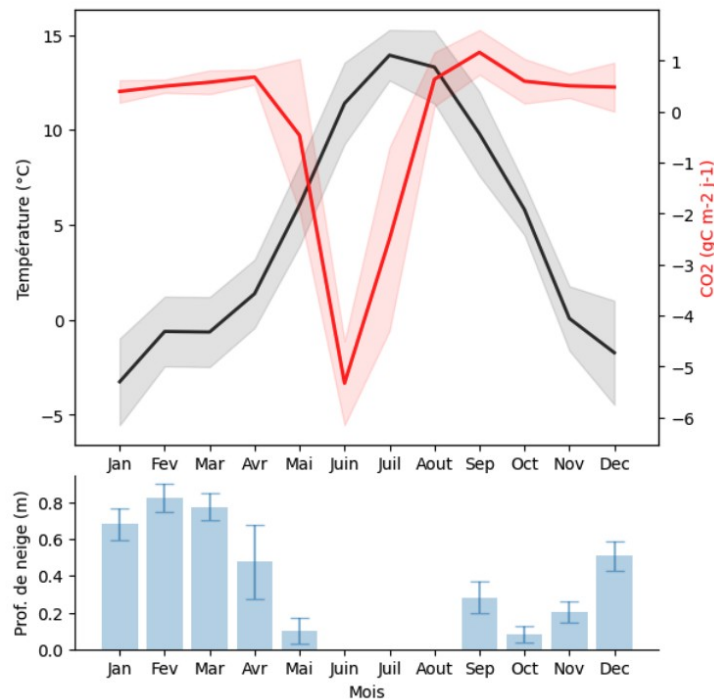


Figure X : Cycle annuel moyen de la température (°C), de la profondeur de neige (m) et du flux de CO₂ (gC/m²/j) à la station du col du Lautaret (période 2019-2023)

La courbe noire représente la température moyenne mensuelle avec l'écart-type figuré en gris. La courbe rouge illustre la composante saisonnière (somme mensuelle) du flux de CO₂ avec l'écart-type en rouge clair. La profondeur de neige moyenne mensuelle est donnée par le diagramme bâtons, l'écart-type étant symbolisé par les barres d'erreur.

Ce cycle annuel moyen peut être mis en parallèle avec le NDVI et les différentes phases de végétation qu'il met en lumière (Figure X). Chaque année, la végétation commence à croître mi-avril, avant que le NDVI atteigne un plateau au milieu de l'été. Puis à partir de juillet a lieu la phase de déclin (en rouge sur le graphique) qui correspond à la sénescence des plantes. Le NDVI ne fait ensuite que diminuer, jusqu'à atteindre la valeur caractéristique de la couverture neigeuse.

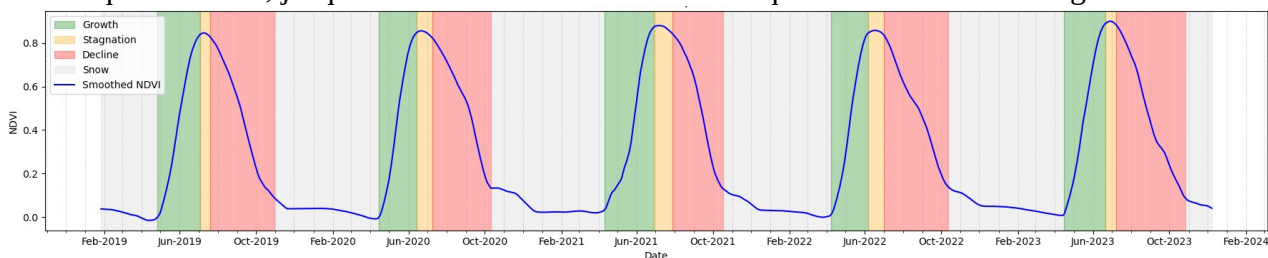
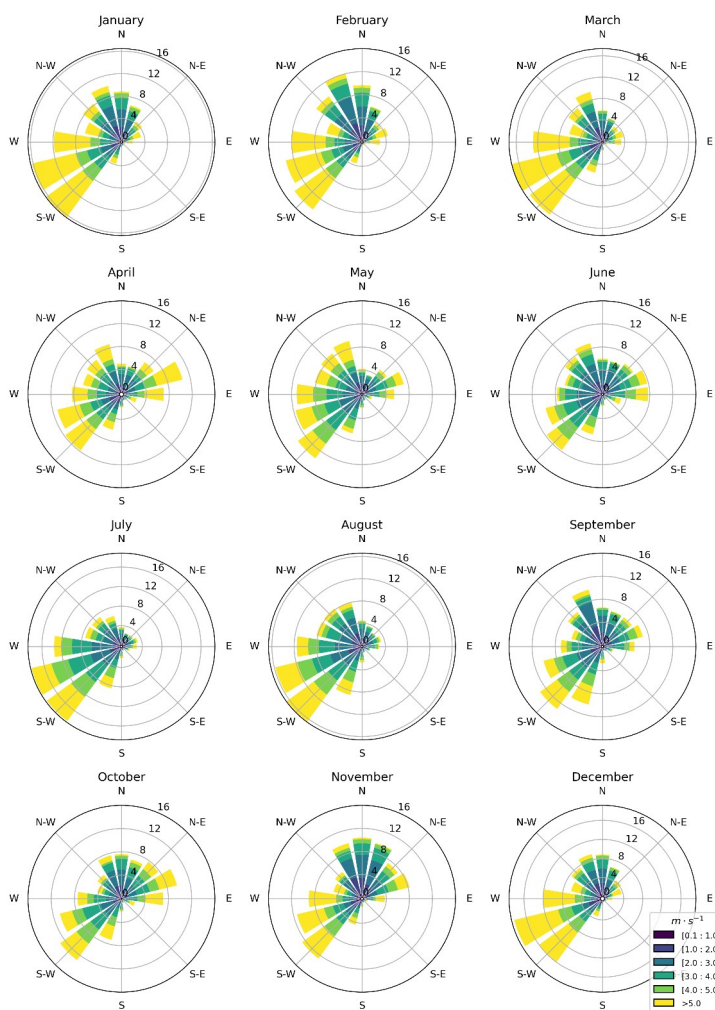


Figure X : Evolution du NDVI lissé sur la période 2019-2023 et phases de végétation correspondantes (croissance, stagnation, déclin)

La station de mesure étant située proche d'un col et d'une crête, elle subit des régimes de vent particuliers. Ceux-ci dépendent également des saisons, comme illustré par la Figure X.



Source : Géoportail

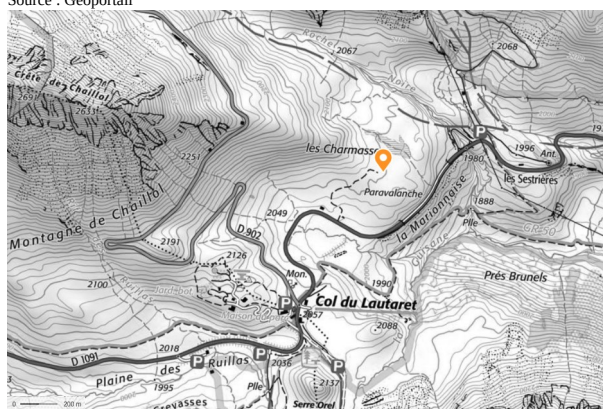


Figure X : Rose des vents pour chaque mois à la station du col du Lautaret et carte de la zone environnante

Les orientations du vent sont divisées en 16 segments. La longueur de chaque « pic » représente la fréquence (en %) à laquelle le vent souffle en provenance de la direction indiquée à l'extérieur du cercle. Chaque couleur représente la vitesse du vent (en m/s). La station de mesure est figurée en jaune sur la carte IGN.

Quel que soit la période de l'année, le vent souffle majoritairement du col vers la station (au Sud-Ouest de la tour à flux), ce qui s'explique par l'effet canalisateur du relief. On remarque également que très peu de vent semble provenir de la route la plus proche (quart Sud-Est de la rose des vents). Les courants forts d'une vitesse supérieure à 5 m/s sont plus fréquents en hiver, ce qui s'explique par exemple par les gradients de pression et de température (vents synoptiques forts). En hiver, la turbulence thermique est réduite car le sol chauffe moins : la convection diminue, ainsi que la friction. On observe un phénomène similaire pour la nuit, durant laquelle les turbulences thermiques sont amorties en comparaison de la journée.

Ces résultats soulignent les principaux stades végétatifs et météorologiques qui définissent le site et vont impacter l'émission et le transport du CO₂, et donc les flux mesurés par la tour. Cette différenciation en huit phases (« Jour/Nuit », « Neige/Croissance/Stagnation/Déclin ») est conservée pour la détermination de l'origine des flux de carbone.

III) 2) Estimation des zones sources de CO₂

Les résultats du modèle FFP, couplés à des données descriptives de la zone (reliefs, routes, hydrographie), permettent d'identifier les surfaces qui contribuent au flux mesuré par la tour et leurs caractéristiques (voir Figure X ci-dessous).

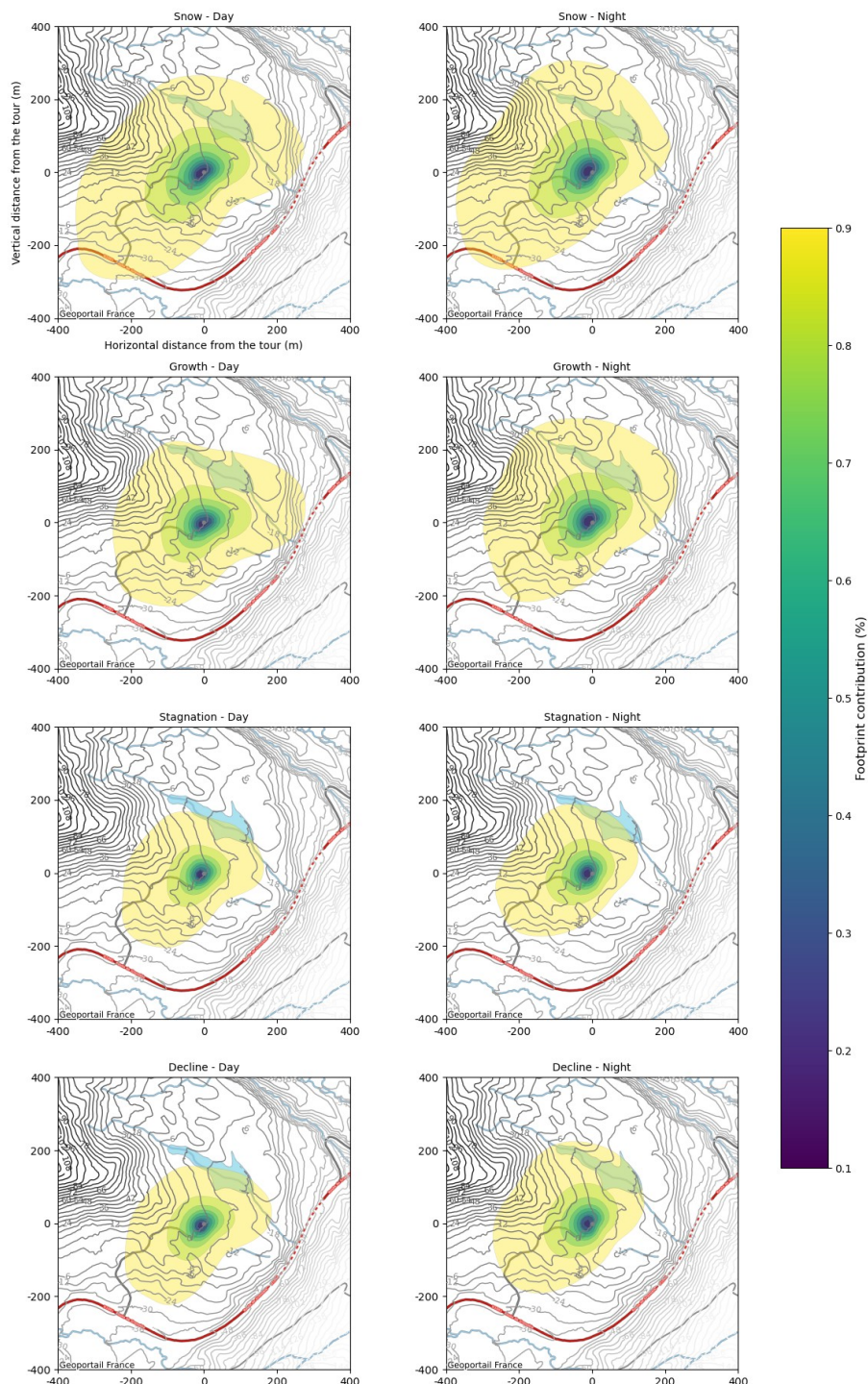


Figure X : Climatologie d'empreinte de la tour ICOS du Lautaret pour les 8 cas (« Jour/Nuit », « Neige/Croissance/Stagnation/Déclin ») d'après le modèle FFP de Kljun et al., 2015

La climatologie d'empreinte est représentée par des zones colorées pour chaque valeur de la contribution à l'empreinte (de 10 à 90%). Le relief est illustré par des lignes de niveau montrant l'altitude relative (en m) à

la tour située au niveau du point gris au centre de la carte. En arrière-plan, les éléments hydrologiques sont figurés en bleu et l'axe routier principal en rouge.

D'après le modèle, 90 % du signal mesuré provient d'une distance pouvant aller jusqu'à 400 mètres de la tour (Neige/Jour). Pour tous les cas de figure, on observe que la zone humide est contenue en totalité ou pour partie dans l'empreinte du flux. Elle contribue davantage au flux lors des phases « Neige » et « Croissance de la végétation ». L'étendue et la forme de l'empreinte est aussi variable entre le jour et la nuit, pour une période donnée. Tout au long de l'année, le début des crêtes au Nord-Ouest est également capté par la tour. Ce relief plus prononcé, ainsi que la route pour les conditions « Neige », peuvent influencer l'émission et le transport du CO₂ dans l'atmosphère.

Bibliographie :

- Agence Nationale de la cohésion des territoires**, 2022. *Présentation du territoire du massif alpin, des instances et des dispositifs contractuels français et européens*. https://www.prefectures-regions.gouv.fr/content/download/101594/645734/file/plaquette_presentation_massif_des_alpes_v10_novembre2022.pdf (Consulté le 16 juin 2025).
- Ainsworth E.A.** et **Long S.P.**, 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165 (2), p. 351-372. DOI : [10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x)
- Arrouays D.**, **Balesdent J.**, **Germon J.C.**, **Jayet P.A.**, **Soussana J.F.**, et **Stengel P.**, 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre : Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* INRA, 36
p.<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/cbb40e809bbb5356d5fcc6a1f48e3121.pdf>
- Baldocchi D.D.**, 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9 (4), p. 479-492. DOI : [10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x)
- Beck H.E.**, **Zimmermann N.E.**, **McVicar T.R.**, **Vergopolan N.**, **Berg A.**, et **Wood E.F.**, 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5 (1), p. 180214. DOI : [10.1038/sdata.2018.214](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214)
- Bonfanti N.**, **Poulenard J.**, **Barre P.**, **Baudin F.**, **Voisin D.**, et **Clement J.-C.**, 2025. Seasonality Alters Soil Organic Matter Properties in Alpine and Subalpine Grasslands. *Ecosystems*, 28 (3), p. 29. DOI : [10.1007/s10021-025-00971-y](https://doi.org/10.1007/s10021-025-00971-y)
- Ciais Ph.**, **Reichstein M.**, **Viovy N.**, **Granier A.**, **Ogée J.**, **Allard V.**, **Aubinet M.**, **Buchmann N.**, **Bernhofer Chr.**, **Carrara A.**, **Chevallier F.**, **De Noblet N.**, **Friend A.D.**, **Friedlingstein P.**, **Grünwald T.**, **Heinesch B.**, **Keronen P.**, **Knohl A.**, **Krinner G.**, **Loustau D.**, **Manca G.**, **Matteucci G.**, **Miglietta F.**, **Ourcival J.M.**, **Papale D.**, **Pilegaard K.**, **Rambal S.**, **Seufert G.**, **Soussana J.F.**, **Sanz M.J.**, **Schulze E.D.**, **Vesala T.**, et **Valentini R.**, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437 (7058), p. 529-533. DOI : [10.1038/nature03972](https://doi.org/10.1038/nature03972)
- Couillet J.C.**, 2002. *Dispersion atmosphérique (mécanismes et outils de calcul)*. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 61
p.<https://pollution.ott.fr/wp-content/uploads/2021/12/Dispersion-Ineris-2002-46web.pdf>
- Dondini M.**, **Martin M.**, **De Camillis C.**, **Uwizye A.**, **Soussana J.-F.**, **Robinson T.**, et **Steinfeld H.**, 2023. *Global assessment of soil carbon in grasslands*. FAO ISBN 978-92-5-137550-1 (FAO Animal production and health, 187) DOI : [10.4060/cc3981en](https://doi.org/10.4060/cc3981en)
- FAO**, 2024. *FAOSTAT*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL/visualize> (Consulté le 29 avril 2025).

Foken T., 2008. *Micrometeorology*. Berlin, Heidelberg : Springer ISBN 978-3-540-74665-2 DOI : [10.1007/978-3-540-74666-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74666-9)

Foken T., Aubinet M., et Leuning R., 2012. The Eddy Covariance Method. Dans : Aubinet M., Vesala T., Papale D. (éd.). *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 1-19. DOI : [10.1007/978-94-007-2351-1_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_1)

Friedlingstein P., et al., 2025. Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17 (3), p. 965-1039. DOI : [10.5194/essd-17-965-2025](https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025)

Gac A., Dollé J.-B., Le Gall A., Klumpp K., Tallec T., Mousset J., Eglin T., Bispo A., Peyraud J.-L., et Faverdin P., 2010. *Le stockage de carbone par les prairies : Une voie d'atténuation de l'impact de l'élevage herbivore sur l'effet de serre*. Institut de l'Elevage - INRA, 12 p. [hal-02824535](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02824535)

Gottfried M. et al., 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2, p. 111-115. DOI : [10.1038/nclimate1329](https://doi.org/10.1038/nclimate1329)

Gupta A., 2022. *Modélisation de l'eau, de l'énergie et du temps de séjour dans une zone critique subalpine*. (These de doctorat). Université Grenoble Alpes. <https://theses.fr/2022GRALU029>

Herfurth D., 2015. *Impact des pratiques de gestion sur le stockage du Carbone dans le sol des écosystèmes prairiaux*. (phdthesis). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. <https://theses.hal.science/tel-01343375>

Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R. s., Clague J. j., Vuille M., Buytaert W., Cayan D. r., Greenwood G., Mark B. g., Milner A. m., Weingartner R., et Winder M., 2017. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5 (5), p. 418-435. DOI : [10.1002/2016EF000514](https://doi.org/10.1002/2016EF000514)

ICOS, 2025. *Data portal*. <https://data.icos-cp.eu/portal/> (Consulté le 15 mai 2025).

Kljun N., Rotach M.W., et Schmid H.P., 2002. A Three-Dimensional Backward Lagrangian Footprint Model For A Wide Range Of Boundary-Layer Stratifications. *Boundary-Layer Meteorology*, 103 (2), p. 205-226. DOI : [10.1023/A:1014556300021](https://doi.org/10.1023/A:1014556300021)

Kump L.R., Kasting J.F., et Crane R.G., 1999. *The Earth System*. Prentice Hall, 368 p. ISBN 10. 0321597796

Lange M. et Focken U., 2006. *Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction*. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag ISBN 978-3-540-25662-5 DOI : [10.1007/3-540-31106-8](https://doi.org/10.1007/3-540-31106-8)

Li Y.-L., Tenhunen J., Owen K., Schmitt M., Bahn M., Drosler M., Otieno D., Schmidt M., Gruenwald Th., Hussain M.Z., Mirzae H., et Bernhofer Ch., 2008. Patterns in CO2 gas exchange capacity of grassland ecosystems in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (1), p. 51-68. DOI : [10.1016/j.agrformet.2007.09.002](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.002)

Malanson G.P., Fagre D.B., Butler D.R., et Shen Z., 2024. Alpine plant communities and current topographic microrefugia vary with regional climates. *Geomorphology*, 458, p. 109241. DOI : [10.1016/j.geomorph.2024.109241](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109241)

Marcolla B., Cescatti A., Manca G., Zorer R., Cavagna M., Fiora A., Gianelle D., Rodeghiero M., Sottocornola M., et Zampedri R., 2011. Climatic controls and ecosystem responses drive the inter-annual variability of the net ecosystem exchange of an alpine meadow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (9), p. 1233-1243. DOI : [10.1016/j.agrformet.2011.04.015](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.04.015)

Ministère de la Transition Ecologique, 2023. *Ce qu'il faut retenir du 6e rapport d'évaluation du GIEC*. 4 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20250_4pages-GIEC-2.pdf

Monin A.S. et Obukhov A.M., 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst.*, 24(151), p. 163-187.

Moureaux C., Bodson B., et Aubinet M., 2008. Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné de grandes cultures : état de la question et méthodologie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12(3), p. 303-315.

Nagy Z., Pintér K., Czóbel Sz., Balogh J., Horváth L., Fóti Sz., Barcza Z., Weidinger T., Csintalan Zs., Dinh N.Q., Grosz B., et Tuba Z., 2007. The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121 (1), p. 21-29. DOI : [10.1016/j.agee.2006.12.003](https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.003)

Pepin N., Bradley R.S., Diaz H.F., Baraer M., Caceres E.B., Forsythe N., Fowler H., Greenwood G., Hashmi M.Z., Liu X.D., Miller J.R., Ning L., Ohmura A., Palazzi E., Rangwala I., Schöner W., Severskiy I., Shahgedanova M., Wang M.B., Williamson S.N., Yang D.Q., et Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5 (5), p. 424-430. DOI : [10.1038/nclimate2563](https://doi.org/10.1038/nclimate2563)

Peyraud J.L., Peeters A., et De Vlieghe A., 2012. *Place et atouts des prairies permanentes en France et en Europe*. 12 p.

Ramonet M. et al., 2020. The fingerprint of the summer 2018 drought in Europe on ground-based atmospheric CO₂ measurements. *Phil. Trans. R. Soc B*, (375), p. 14. DOI : [10.1098/rstb.2019.0513](https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0513)

Reichstein M., Bahn M., Ciais P., Frank D., Mahecha M.D., Seneviratne S.I., Zscheischler J., Beer C., Buchmann N., Frank D.C., Papale D., Rammig A., Smith P., Thonicke K., van der Velde M., Vicca S., Walz A., et Wattenbach M., 2013. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500 (7462), p. 287-295. DOI : [10.1038/nature12350](https://doi.org/10.1038/nature12350)

Rogger J., Hörtnagl L., Buchmann N., et Eugster W., 2022. Carbon dioxide fluxes of a mountain grassland: Drivers, anomalies and annual budgets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 314, p. 108801. DOI : [10.1016/j.agrformet.2021.108801](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108801)

Rogiers N., Eugster W., Furger M., et Siegwolf R.T.W., 2005. Effect of land management on ecosystem carbon fluxes at a subalpine grassland site in Swiss Alps. 80, p. 187-203. DOI : [10.1007/s00704-004-0099-7](https://doi.org/10.1007/s00704-004-0099-7)

Stull R.B., éd., 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht : Springer Netherlands ISBN 978-90-277-2769-5 DOI : [10.1007/978-94-009-3027-8](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8)

Van der Hoven I., 1957. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 14 (2), p. 160-164. DOI : [10.1175/1520-0469\(1957\)014<0160:PSOHWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014<0160:PSOHWS>2.0.CO;2)

Verrall B. et **Pickering C.M.**, 2020. Alpine vegetation in the context of climate change : A global review of past research and future directions. *Science of the Total Environment*, 748. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2020.141344](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141344)

Vivaldo G., **Magnani M.**, **Baneschi I.**, **Boiani M.V.**, **Catania M.**, **Giamberini M.**, **Parisi A.**, **Raco B.**, et **Provenzale A.**, 2023. Carbon dioxide exchanges in an alpine tundra ecosystem (Gran Paradiso National Park, Italy): A comparison of results from different measurement and modelling approaches. *Atmospheric Environment*, 305, p. 119758. DOI : [10.1016/j.atmosenv.2023.119758](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119758)

White R.P., **Murray S.**, et **Rohweder M.**, 2000. *Pilot Analysis of Global Ecosystems : Grassland Ecosystems*. World Resources Institute, 81 p. ISBN 1-56973-461-5