

Le vent, l'ovine et le loup :

une fable moderne écrite dans les sols des reposoirs d'altitude

E. Dambrine^(1*), A. Reveret⁽¹⁾, V. Darves-Blanc⁽¹⁾, M. Thinon⁽²⁾, J.-E. Brochier⁽²⁾,
J. N. Avrillier^(1,3), A. Millery^(1,3) et G. Pellet⁽³⁾

1) CARRTEL, INRAE-Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget du Lac, France

2) Aix Marseille Univ, CNRS, Minist. Culture, LAMPEA, UMR 7269, France

3) LECA, Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget du Lac, France

* Auteur correspondant : etienne.dambrine@inrae.fr

RÉSUMÉ

En montagne, les troupeaux d'ovins, lorsqu'ils sont livrés à eux-mêmes, ont tendance à monter au cours de la journée et établissent leurs quartiers nocturnes sur des replats localisés en crêtes, dans des positions très singulières, décrites comme des invariants de l'espace : les « couchades ». Leurs sols reçoivent les déjections nocturnes du troupeau et sont marqués par une végétation exubérante, nitrophile et phosphorophile. Le présent article décrit l'un de ces sols développé au sommet d'une petite colline à 2 100 m d'altitude, au Col du Lautaret (Hautes Alpes). L'horizon supérieur de ce sol est formé d'une épaisse (20-30 cm) accumulation de matière organique fibreuse dont le rapport C/N est égal à 8 et le $\delta^{15}\text{N}$ à 9 ‰. Sur l'ensemble du profil, ce sol contient un stock extrêmement élevé de carbone (40 kg C m^{-2}), d'azote et de phosphore, et il est carbonaté en surface, ce qui le distingue de manière très générale des sols de cet étage bioclimatique dans les Alpes. Ces propriétés sont mises en relation avec, d'une part, le flux et la composition des déjections, et d'autre part, le gel hivernal. En effet, en raison de sa localisation qui favorise le déneigement, ce sol gèle l'hiver. Nous montrons ainsi qu'en haute montagne, les troupeaux jouent un rôle d'ascenseur de fertilité qui contrebalance l'appauvrissement naturel des sols conditionné par le climat et la pente. Ces accumulations de carbone et de nutriments sur les crêtes sont liées à un mode de conduite des troupeaux adopté au cours des XIX^e et XX^e siècles, en l'absence de loups. Depuis le retour du loup, la garde nocturne des brebis en parc à proximité des cabanes conduit à une nouvelle redistribution des nutriments sur les versants et souvent près des points d'eau. Ainsi, le loup apparaît comme un agent indirect de la pédogénèse et de la distribution spatiale de la fertilité dans les Alpes.

Mots-clés

Sol reposoir, déjection, ovine, crête ventée, carbone, nutriment, Alpes

Comment citer cet article :

Dambrine E., Reveret A., Darves-Blanc V., Thinon M., Brochier J.-E., Avrillier J. N., Millery A., et Pellet G., 2023 - Le vent, l'ovine et le loup : une fable moderne écrite dans les sols des reposoirs d'altitude, *Étude et Gestion des Sols*, 30, 333-346

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-30/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :
<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

SUMMARY**THE WIND, THE SHEEP AND THE WOLF: A modern fable written in the soil of high altitude resting places**

In the mountains, sheep flocks, when left to their own devices, tend to climb during the day and establish their nightly quarters on localized ridge flats, in very singular positions, described as invariants of space: the "couchades". Their soils receive the nocturnal droppings of the herd and are marked by exuberant, nitrophilic and phosphophilic vegetation. This article describes one of these soils developed at the top of a small hill at 2100 m altitude, at the Col du Lautaret (Hautes Alpes). The upper horizon of this soil is formed by a thick (20-30 cm) accumulation of fibrous organic matter whose C/N ratio is equal to 8 and $\delta^{15}\text{N}$ is 9 ‰. Over the whole profile, this soil contains an extremely high stock of carbon (40 kg C m⁻²), nitrogen and phosphorus, and it is carbonated on the surface, which distinguishes it in a very general way from soils of this bioclimatic stage in the Alps. These properties are related to the flow and composition of dung on the one hand and to the winter frost on the other. Indeed, due to its location, which favours snow removal, this soil freezes in winter. We thus show that in the high mountains, the herds play a role of fertility lift that counterbalances the natural impoverishment of the soil conditioned by the climate and the slope. These accumulations of carbon and nutrients on the ridges are linked to a method of herding adopted in the 19th and 20th centuries, in the absence of wolves. Since the return of the wolf, the nightly guarding of the ewes in pens near the shepherd's huts has led to a new redistribution of nutrients on the slopes and often near water points. Thus, the wolf appears to be an indirect agent of pedogenesis and spatial distribution of fertility in the Alpine pastures.

Key-words

Soil, resting place, dung, sheep, windy ridge, carbon, nutrient, Alps

RESUMEN**EL VIENTO, LA OVEJA Y EL LOBO: Una fábula moderna escrita en el suelo de los descansos de altura**

En la montaña, los rebaños de ovejas, cuando se les deja a su aire, tienden a subir durante el día y a establecer sus aposentos nocturnos en planos de cresta localizados, en posiciones muy singulares, descritas como invariantes del espacio: las "couchades". Sus suelos reciben los excrementos nocturnos de la manada y están marcados por una vegetación exuberante, nitrófila y forófila. Este artículo describe uno de estos suelos desarrollado en la cima de una pequeña colina a 2100 m de altitud, en el Col du Lautaret (Hautes Alpes). El horizonte superior de este suelo está formado por una gruesa acumulación (20-30 cm) de materia orgánica fibrosa cuya relación C/N es igual a 8 y el $\delta^{15}\text{N}$ a 9 ‰. En todo el perfil, este suelo contiene una reserva extremadamente alta de carbono (40 kg C m⁻²), nitrógeno y fósforo, y está carbonatado en la superficie, lo que lo distingue de manera muy general de los suelos de este estadio bioclimático en los Alpes. Estas propiedades están relacionadas con el flujo y la composición del estiércol, por un lado, y con las heladas invernales, por otro. De hecho, debido a su ubicación, que favorece la retirada de la nieve, este suelo se congela en invierno. Así, demostramos que en la alta montaña, los rebaños desempeñan un papel de elevación de la fertilidad que contrarresta el empobrecimiento natural del suelo condicionado por el clima y la pendiente. Estas acumulaciones de carbono y nutrientes en las crestas están relacionadas con un método de pastoreo adoptado en los siglos XIX y XX, en ausencia de lobos. Desde el regreso del lobo, la vigilancia nocturna de las ovejas en los corrales cercanos a las cabañas ha provocado una nueva redistribución de los nutrientes en las laderas y, a menudo, cerca de los puntos de agua. Así, el lobo parece ser un agente indirecto de la pedogénesis y de la distribución espacial de la fertilidad en los pastos alpinos.

Palabras clave

Suelo, lugar de descanso, estiércol, oveja, cresta ventosa, carbono, nutriente, Alpes

En montagne, les troupeaux ovins, lorsqu'ils sont laissés libres à eux-mêmes, ont tendance à monter au cours de la journée et établissent leurs quartiers nocturnes sur les crêtes, où ils se rassemblent (Browns, 1971 ; Savini *et al.*, 1993 ; Mysterud *et al.*, 2007 ; Meuret, 2010). Plusieurs raisons sont suggérées pour expliquer cette localisation :

- commodité physique : les moutons broutent naturellement vers l'amont, de sorte qu'ils ont tendance à s'élever pendant la journée en altitude ;
- thermorégulation : la rumination produit une chaleur interne dont l'effet est réduit par l'altitude et qu'un vent permanent au voisinage des crêtes permettrait de dissiper (Hocquette *et al.*, 1992). Ceci permet d'expliquer la présence fréquente d'ovins au front des glaciers pendant l'estive (Turquin et Lebaudy, 2015) ;
- évitement : le troupeau fuit mouches et taons (Turquin et Lebaudy, 2015). Le vent limiterait le dérangement par les insectes (Mooring *et al.*, 2003) ;
- habitude : les ovins suivent des parcours « culturels » appris auprès des anciens et marqués par leurs odeurs, et ces reposoirs sont des invariants de l'espace pastoral (Savini *et al.*, 1993).

Ces reposoirs ovins d'altitude, appelés aussi « couchades », sont reconnaissables par une végétation nitrophile et phosphorophile caractéristique (le Rumicion alpin). Leur localisation près des crêtes favorise un gel hivernal des sols, car le vent limite la couverture neigeuse en début d'hiver et prolonge ce gel au début du printemps. Cependant, des couchades s'observent aussi à l'entrée de grottes-bergeries dès le Néolithique moyen (Brochier, 2006) et plus généralement à proximité immédiate des bâtiments d'élevage, et d'un point d'eau. Cette localisation permet de tirer parti du fumier, et de protéger les animaux vis-à-vis des prédateurs comme le loup.

L'évolution historique des populations de loups est connue grâce aux primes payées par le pouvoir pour leur éradication. En Dauphiné, autour de 1750, les chasseurs en tuèrent plus de 400 ! Cependant, à compter de 1755, le nombre des loups tués n'a cessé de décroître. Après 1770 il ne dépasse plus guère 200 par an (Favier, 2002). En France, vers 1800, plus de 5 000 loups sont tués annuellement (Molinier, 2002), dont entre 2,5 et 5 loups adultes par 1 000 km² dans les départements de l'Isère et des Hautes-Alpes. Molinier et Molinier-Meyer (1981) estiment que la population de loups dans la France du Directoire serait proche de 6 000 individus. Détail important, 1,1 % de ces loups sont enrégés et causent des dégâts considérables aux troupeaux ainsi qu'à l'homme. Mais en 1819, le nombre de loups a baissé de 60 % et ils disparaissent progressivement au cours du XIX^e siècle, puis totalement à l'aube du XX^e.

La disparition progressive puis totale du loup en France au cours du XIX^e siècle a permis aux bergers de laisser les ovins choisir librement l'emplacement de leurs couchades nocturnes et ceux-ci les ont placées sur les crêtes du relief. Mais depuis une vingtaine d'années, le loup est de retour dans les

Alpes, et actuellement, près de 500 loups en France causent annuellement la mort d'environ 15 000 animaux d'élevage (Meuret *et al.*, 2017). Cette irruption a profondément modifié les pratiques d'élevage. Actuellement, les troupeaux sont le plus souvent enclos dans des parcs de nuit à proximité de l'habitation du berger (Lapeyronie et Moret, 2007), et protégés par des chiens de garde.

Le but de cette étude est de caractériser le sol d'un reposoir de crête, de montrer à quel point ces sols sont modifiés par cette situation et, inversement, de suggérer que ces sols sont des témoins de l'évolution au cours du temps des relations homme-milieux en haute montagne.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1. Site d'étude

Situé dans les Hautes-Alpes, à 2 057 m d'altitude, le col du Lautaret relie les vallées de la Haute Romanche à l'Ouest et de la Haute Guisane à l'Est (*Figure 1*). Il est à cheval sur les communes de Villar-d'Arène pour la partie Ouest et de Monêtier-les-Bains pour la partie Est. Ce col fait partie intégrante du Parc National des Ecrins et a été l'objet d'un grand nombre d'études d'écologie alpine depuis un siècle (Aubert *et al.*, 2011). C'est enfin un site d'observation majeur de la Zone Atelier Alpes (<http://www.za-alpes.org/-Master-Sites->). Au centre du col se trouve une petite colline d'environ 80 m de haut, à bords abrupts (50 et 70 %), le Serre Orel (*Figure 1 et 2*) que les locaux nomment « le tétou du Lautaret ». C'est une butte témoin constituée de calcaire du Lias dégagée des schistes tendres qui l'entourent par les glaciers lors de la dernière glaciation. Ce calcaire se retrouve au Nord-Est de la butte au niveau d'une butte moins importante et au Nord au-dessus du jardin alpin du Lautaret. Des placages glaciaires entourent la butte au niveau du col du Lautaret. Sur la partie sommitale du Serre Orel se trouve un replat ovale de 350 m², en pente faible (14 %) d'orientation générale Ouest-Est.

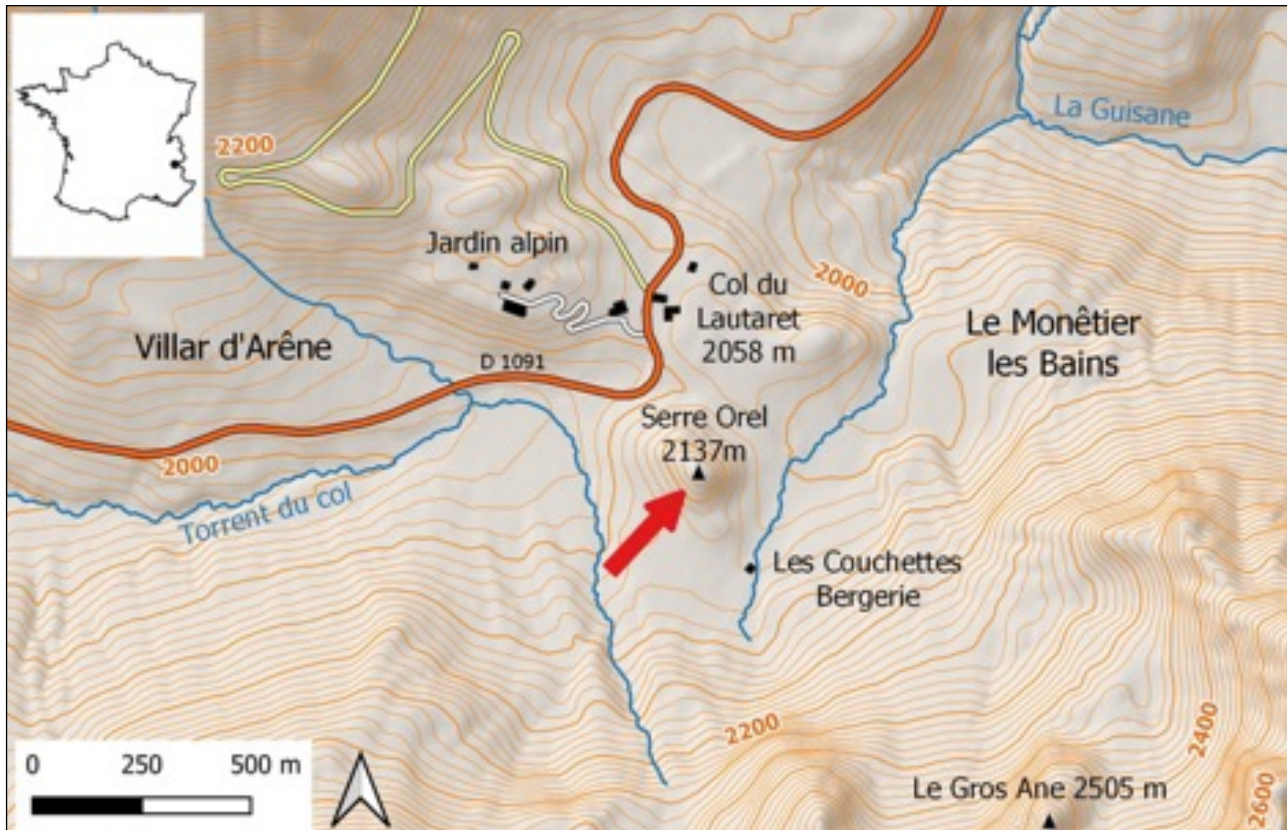
1.1.1. Climat

Le secteur du Lautaret est à la limite entre les Alpes externes du Nord bien arrosées et les Alpes internes du Sud plus sèches. À Villar d'Arènes (1 670 m), il tombe environ 1 000 mm d'eau par an en majorité sous forme de précipitations neigeuses, qui s'accumulent de novembre-décembre à avril-mai selon les années et l'exposition (Baptist, 2008). D'après les données du poste météorologique installé au col du Lautaret, la pluviométrie annuelle serait plutôt proche de 500 mm, sans doute en raison du vent.

Le Col du Lautaret, et plus précisément le Serre Orel, de par sa position en relief au milieu d'un col, peut être considéré

Figure 1 : le Col du Lautaret et le Serre Orel (flèche rouge) (carte topographique au 1/25 000). Au Sud du col se situent les terrains cristallins du massif du Combeynot, couverts de pelouses et de landes acidophiles ; au Nord du col, les terrains sédimentaires cultivés en terrasse jusque dans les années 1950 sont actuellement couverts de prairies pâturées ou fauchées. On notera la présence d'une bergerie, « les Couchettes », au bas du Serre Orel, toujours en usage à l'heure actuelle.

Figure1: The Lautaret pass and the Serre Orel (red arrow) (1:25,000 topographic map). To the south of the pass are granitic rocks of the Combeynot massif, covered with acidophilous meadows and heathlands; to the north of the pass, soils developed from sedimentary rocks, cultivated in terraces until the 1950s, are currently covered with grazed or mown meadows. The sheepfold, "les Couchettes", south of the Serre Orel, is still in use today.



comme un système thermique de crête. Le nombre de jours sans dégel est proche de 20 jours par mois de décembre à mars. Il subit l'influence d'un vent « quasi permanent » orienté d'Ouest en Est, avec des rafales à plus de 60 km/h plusieurs jours par mois. Cette situation particulière est utilisée l'hiver comme l'été par les amateurs de parapente ascensionnel. Ce vent déneige le rebord occidental de la crête du Serre Orel, et conduit à la formation d'une congère de neige épaisse de plusieurs mètres sur son rebord oriental (Figure 2).

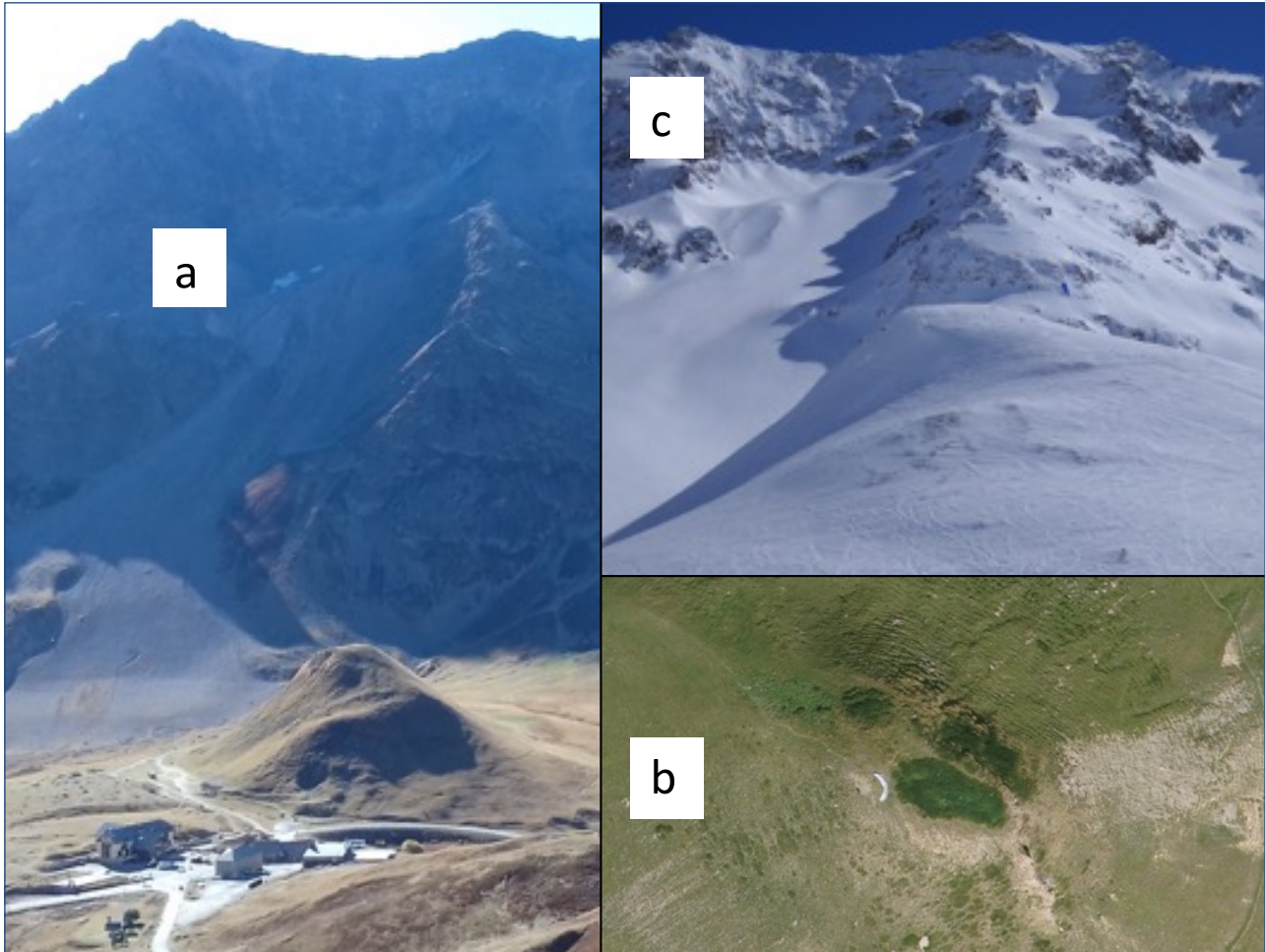
1.1.2. Végétation

Le sommet du Serre Orel appartient au niveau supérieur de l'étage subalpin et sa végétation devrait être forestière, s'inscrivant dans la série de végétation du mélèze (Dobremez et al., 1974). Aujourd'hui, il est couvert d'une végétation haute et

dense composée presque exclusivement d'Ortie dioïque (*Urtica dioica* L.) avec quelques pieds de Chénopode Bon-Henri (*Blitum bonus-henricus* (L.) C.A.Mey.) et d'Oseille des Alpes (*Rumex alpinus* L.). La transition est brutale (quelques mètres) sur le pourtour du replat avec une pelouse maigre à Seslerie (*Sesleria caerulea* L.). Cette pelouse écorchée par le passage du troupeau couvre les sols peu épais (10 cm) et les affleurements rocheux formant les flancs raides de la butte. Plus bas sur la pente on trouve des pelouses calcicoles sèches à Brome dressé (*Bromopsis erecta* Huds.). Au pied du Serre Orel, les épandages périglaciaires en pente faible sont occupés par une pelouse acidophile à Nard (*Nardus stricta* L.). Plus au Sud, couvrant les moraines du Combeynot, s'étendent des landes acidophiles à Ericacées.

Figure 2 : a) Vue estivale du Col du Lautaret, avec le Serre Orel au centre. b) : Vue aérienne du Serre Orel, avec la tache verte du reposoir, au sommet. c) Vue hivernale, on distingue les traces de ski des amateurs de parapente ascensionnel, et la corniche de neige. Au fond, le massif cristallin du Combeynot.

Figure 2: a) summer view of the Col du Lautaret, with the Serre Orel in the centre. b) Aerial view of the Serre Orel, with the green spot of the resting place, at the top. c) winter view, with the ski tracks of paragliders, and the snow cornice. In the back, the Combeynot massif.



1.2. Méthodes

1.2.1. Description du sol et prélèvements des échantillons

Les échantillons ont été prélevés le 6 octobre 2017 selon 7 profils régulièrement espacés selon un axe Ouest-Est (W-E) de 27 m de long et un axe Sud-Nord (S-N) de 13 m de long (Figure 3), de façon à couvrir toute la zone de couchade.

La description du profil du Centre a été effectuée sur fosse pédologique et chaque horizon a été prélevé de manière représentative suivant une tranche verticale. Pour préserver le site, et son exigüité, les autres profils ont été prospectés à la tarière, prélevés tous les 10 cm et pour chaque profil les échantillons appartenant au même horizon ont été regroupés à

postériori. Le profil TR4 W-E a été aussi décrit car il présentait une *morphologie légèrement différente du profil Centre* (Figure 4). Des échantillons de sol d'environ 1 kg par horizon ont été prélevés, séchés à l'air puis tamisés à 2 mm et le refus a été pesé. La teneur en eau a été mesurée par pesée sur une aliquote (différence après une nuit à 105 °C).

1.2.2. Observation hivernale

Le gel du sol au Serre Orel a été observé le 23 mars 2018, en effectuant une série de profils dans la neige suivant l'axe (TR1-TR4) de plus grande pente et de plus forte accumulation de neige.

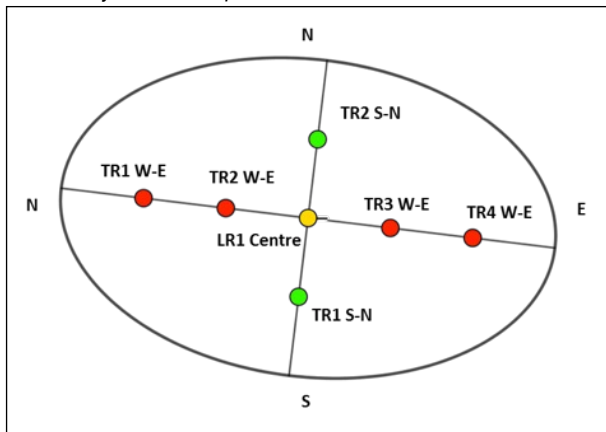
Tableau 1 : Données météorologiques au col du Lautaret pour l'année 2017-2018 (www.romma). Les données sont prises de Juin à Mai car les données Juin-septembre 2018 ne sont pas disponibles.

Table 1: Weather data at the Lautaret pass for the year 2017-2018 (www.romma). The data is taken from June to May as the June-September 2018 data is not available.

Mois	Juin	juil	Aout	Sept	Oct.	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avri	Mai
Pluviométrie (mm)	70	62	88	33	9	49	72	97	20	64	18	64
T moy (°C)	12,7	12,6	13,9	6,7	7,5	-	-4,3	-2,1	-7,5	-4	3,4	6,2
Nbre jours sans dégel	0	0	0	0	0	14	21	17	25	21	2	0
Vent moyen (km.h ⁻¹)	11	12	12	11	13	12	3		13			
Rafale max (km.h ⁻¹)	64	72	64	62	61	72		111	74	74	91	62
Nbre jours vent violent	1	3	1	1	1	2		9	2	4	7	3

Figure 3 : Schéma du reposoir au sommet du Serre Orel, avec la disposition des 7 profils et leur dénomination

Figure 3: Diagram of the resting place at the top of Serre Orel, with the layout of the 7 profiles and their names.



1.2.3. Analyses

Densité apparente

Elle a été mesurée dans chaque horizon du profil LR1 en enfonçant latéralement trois anneaux métalliques de 95 cm³, soit un volume total de 285 cm³. Ce volume est pesé après séchage à 105 °C et tamisage à 2 mm. Les valeurs de densité mesurées en LR1 ont été attribuées aux échantillons prélevés à la tarière en fonction de l'horizon.

pH eau

Après 4 heures de contact dans un rapport 10 g sol/ 25 ml d'eau déminéralisée, la mesure a été effectuée dans un tube agité en permanence, sur les échantillons des profils TR2 WE et TR4 WE.

Teneur en matière organique (MO)

La perte au feu a été mesurée par combustion à 550°C au four à moufle. La différence de masse obtenue avant et après la combustion, rapportée à la masse sèche à 105 °C donne la teneur en MO.

Le stock de MO du sol (kg/m²) a été calculé pour les 7 profils prélevés comme le produit de la teneur (en %), par la densité (kg/dm³) et l'épaisseur (mm)

Teneurs en C et N organiques et abondances isotopiques naturelles en ¹³C et ¹⁵N

Après broyage, 10 mg de sol des échantillons des profils TR2 W-E et TR4 W-E ont été pesés et introduits dans des capsules d'étain, et placées dans un analyseur élémentaire (Iso-prime100, Elementar UK) couplé à un spectromètre de masse (vario ISOTOPE cube, Elementar). Ces analyses ont été réalisées sur la plateforme SILVATECH (Silvatech, INRAE, 2018). Les teneurs en C et N sont exprimées en % de la matière sèche, Les abondances isotopiques sont exprimées en unité delta (‰) rapportées à la composition des standards usuels (PDB et air respectivement). L'incertitude sur la mesure du δ¹³C est de 0.3 ‰ et de 0,5 ‰ pour le δ¹⁵N.

Datation

L'âge ¹⁴C du carbone organique de deux échantillons situés à la transition entre la couche organique et le profil minéral (à 29 et 30 cm de profondeur respectivement) a été mesuré au Radiocarbon Laboratory de Poznań.

Teneur en carbonate

Elle a été mesurée par perte au feu au four à moufle, entre 550 et 950 °C. La variation de cette teneur a été vérifiée au calcimètre de Bernard (Baize, 2000).

Teneur en Phosphore total

Les analyses ont été effectuées à INRAE de Thonon sur les profils TR2 W-E, TR4 W-E et TR2 S-N et LR1 Centre. Brièvement, 100 ± 5 mg de broyat sont dissous dans 2 g de soude solide chauffée à 370 °C durant 15 minutes, puis repris dans 20 ml d'acide chlorhydrique dilué au 1/3. Le P total est dosé après réduction par l'acide ascorbique.

Le calcul du stock de phosphore pour chaque horizon de chaque profil est le suivant :

$$\text{Stock phosphore (kg P/m}^2\text{)} = \text{moyenne P (mg P/g)} \times \text{densité (kg/m}^3\text{)} \times \text{épaisseur (m)}$$

Le stock moyen en phosphore est calculé en moyennant les stocks des 3 profils, et le stock du Serre Orel est calculé en multipliant la moyenne par la surface qui est de 350 m².

Indicateurs d'usage

La présence et l'abondance de sphérolithes, de phytolithes, d'oxalates, de fibres animales (laine), de statospores de Chrysophycées, de diatomées, d'amibes testacées et de charbons ont été évaluées de manière semi-quantitative par observation microscopique suivant les méthodes décrites dans Brochier (2002).

Gestion pastorale au Col du Lautaret

Les pratiques agricoles et pastorales à Villar-d'Arènes et leur évolution depuis la préhistoire ont été rassemblées par Girel *et al.*, (2010). La relation amicale développée au cours de sa thèse par l'un des auteurs (Pellet, 1986) avec un berger-éleveur âgé de Villar d'Arènes (J.-L. Sionnet) nous a permis de l'interroger longuement sur l'évolution historique des pratiques d'élevage. Ces informations ont été complétées par l'interview du berger transhumant (Bruno Faure) gérant depuis 50 ans le troupeau du col, qui avait eu pour maître J.-L. Sionnet.

2. RÉSULTATS

2.1. Observation hivernale

Au sommet du Serre Orel, en amont du profil TR1 W-E, le sol était déneigé par le vent et profondément gelé. Et partout le long du transect, même sous plus de deux mètres de neige sous la corniche neigeuse (au-dessus de TR4 W-E), le sol était gelé sur plus de 10 cm d'épaisseur.

2.2. Observation estivale

Description des profils

Figure 4 : Profil Centre (à gauche) et profil TR4 W-E (à droite). On remarque la transition abrupte entre l'horizon A (TR Centre : 30 cm, TR4 : 20 cm d'épaisseur) et les horizons inférieurs. L'horizon B1 est plus foncé en TR4 que dans le profil Centre, traduisant une incorporation de MO plus profonde (30 % de MO entre 20 et 35 cm).

Figure 4 : Soil profiles « Centre » (left) and « TR4 W-E » (right). The transition between horizon A (TR Centre: 30 cm, TR4: 20 cm thick) and the lower horizon is abrupt. The B1 horizon is darker in TR4 than in the profile Centre, reflecting a deeper incorporation of OM (30% OM between 20 and 35 cm).



Description du Profil Centre

- L'horizon A11 entre 0 et 5 cm de profondeur est de couleur brun noir rougeâtre foncé (5YR2,5/2), a une structure grumeleuse et une sous-structure micro-agrégée, un toucher gras, contient de très nombreuses racines d'ortie et a une densité de 220 kg/m³.

L'horizon A12 entre 5 et 30 cm de profondeur est de couleur brun noir (code Munsell : 5 ou 7,5YR2,5/2), a une structure massive à débit lamellaire et une sous-structure micro-agrégée, un toucher fibreux sec, contient de très nombreuses racines d'ortie, sans éléments grossiers, et a une densité de 400 kg/m³. On note la présence de lombrics. Sur l'ensemble de l'horizon A1, La teneur en matière organique est proche de

60 %, celle en P total est proche de 7 ‰, le rapport C/N est de 8 et le pH de 6,6.

- La transition avec l'horizon suivant est brutale (1 cm) : la base des agrégats brun foncé devient blanchâtre comme cimentée et se durcit beaucoup en séchant.

- L'horizon B1 entre 30 et 50 cm de profondeur est de couleur brun jaune sombre avec un aspect sale (code Munsell : 7,5YR3/3), a une structure massive et dense, comme cimentée, une sous-structure polyédrique anguleuse de 5 mm, une texture limono-sableuse, contient très peu de racines très fines, très peu de graviers, sans pierres et est compact avec une densité plus élevée de 1 120 kg/m³. Le pH est de 6,9.

- La transition avec l'horizon suivant est diffuse.

- L'horizon B2 entre 50 et 70 cm de profondeur est de couleur brun jaune coloré (7,5YR4/3 à 4/4), il a une structure polyédrique sub-anguleuse assez lâche, une texture limono-sableuse, il contient des graviers anguleux et des pierres qui apparaissent à partir de 60 cm. Sa densité est de 950 kg/m³ et le pH est de 7,1.

Matière organique

La variation des teneurs en MO suit globalement une même tendance, la teneur de l'horizon A varie entre 50 % et 60 % dans les 20 premiers cm. Entre 20 et 30 cm, où se fait la transition entre horizons organique et organo-minéral, elles sont plus variables, entre 10 et 50 %. Des teneurs en MO encore supérieures à 20 % entre 30 et 40 cm de profondeur sont observées dans la plupart des profils du transect Ouest-Est et, entre 50 et 60 cm de profondeur, les teneurs moyennes sont proches de 10 %. Par comparaison, la teneur d'un échantillon (0-10 cm) prélevé sous prairie sur la pente sud à quelques mètres du reposoir est de 13,8 % (Figure 5).

Sur les 2 profils où les teneurs en MO et en carbone ont été mesurées de manière indépendante (TR2 W-E et TR4 W-E), la relation $C = 0,5646 MO$ est forte et linéaire ($R^2 = 0,98$).

Le stock de MO sur les 50 premiers cm des profils varie entre 50 et 85 kg m⁻² (moyenne 77 kg m⁻²), tandis que le stock moyen total de MO par profil est de 87 kg/m².

Les valeurs de C/N obtenues sur les deux profils TR2 et TR4 du transect W-E sont extrêmement basses (entre 7,7 et 8,3) indépendamment de la profondeur. Le $\delta^{13}C$ augmente régulièrement de -28,3 ‰ à -26,8 ‰ avec la profondeur, lorsque la teneur en carbone décroît de 30 à 2 % (Figure 6).

Le $\delta^{15}N$ est particulièrement élevé. Il varie entre 9 et 9,6 ‰ en surface pour des teneurs en azote proches de 3,8 %, et décroît en profondeur à 7 ‰ pour des teneurs comprises entre à 0,3 et 0,6 %.

Le Carbone organique total des deux échantillons du profil Centre, situés à la transition entre les horizons A et B, à 29 et 30 cm de profondeur, a été daté respectivement à 180 ± 30 ans BP (Poz-98905) et 210 ± 30 ans BP (Poz-98906). Ces deux dates, très proches, ne sont pas statistiquement différentes

Figure 5 : Evolution des teneurs en matière organique (%) en fonction de la profondeur (cm) pour chaque profil suivant les transects.

Figure 5: Soil organic matter content (%) as a function of depth (cm) for each profile along the transects.

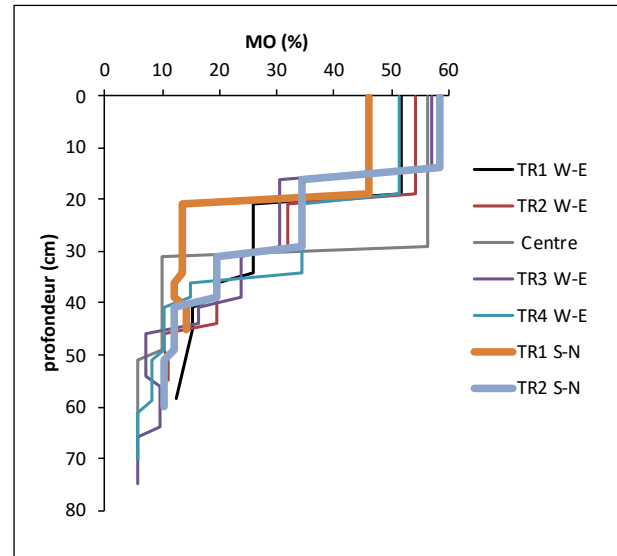
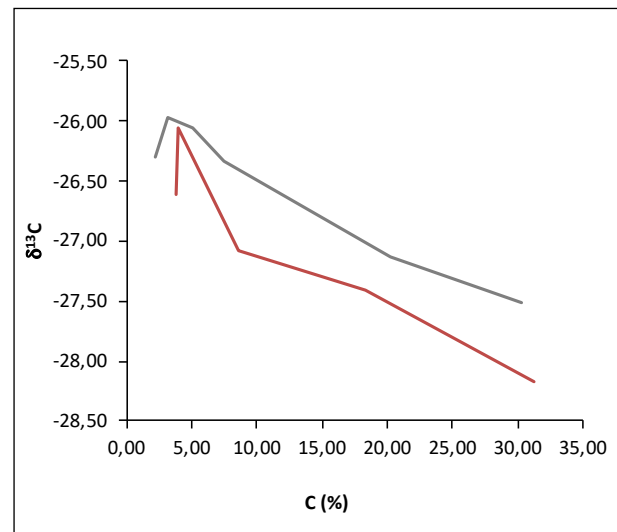


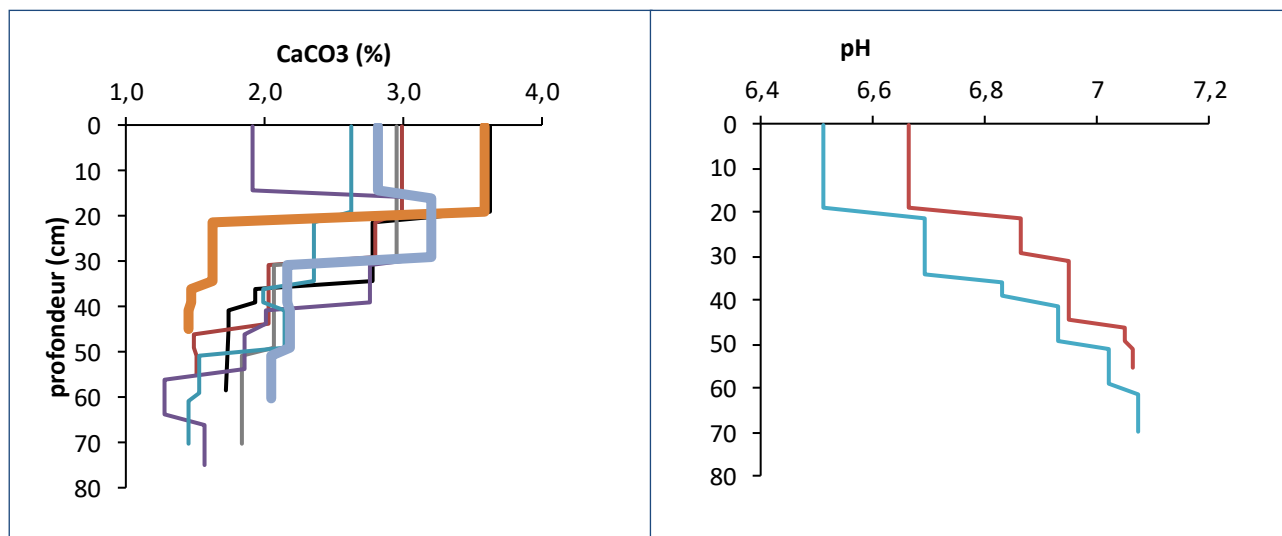
Figure 6 : Variations du $\delta^{13}C$ (‰) en fonction de la teneur en C (%) du sol. Profils TR2 W-E et TR4 W-E.

Figure 6: Soil $\delta^{13}C$ (‰) in relation to C content (%). TR2 W-E and TR4 W-E profiles.



(Ward et Wilson, 1978). Leur combinaison en une date unique moyenne (195 ± 21 BP) calibrée en référence à la courbe IntCal 20 (Reimer et Reimer, 2022) détermine trois intervalles calendaires ayant chacun une probabilité importante : 1660-1690 (22,9 %), 1730-1810 (58,6 %) et 1930-1950 (18,5 %). Si l'inter-

Figure 7 : Variation en fonction de la profondeur du taux de calcaire dans tous les profils, et du pH dans les profils TR2 S-N et TR4 S-N
Figure 7: Soil CaCO₃ content and pH (TR2 S-N et TR4 S-N profiles) in relation to depth.



valle 1730-1810 apparaît le plus probable, les intervalles 1660-1690 et 1930-1950 sont aussi des solutions possibles. L'âge du début de l'accumulation organique reste donc relativement indéterminé; il ne saurait être antérieur à la seconde moitié du XVII^e siècle ni postérieur aux années 1950, et pourrait advenir dans la première moitié du XX^e siècle.

pH et teneur en carbonate de Ca

Le pH eau augmente de manière assez régulière avec la profondeur, entre 6,6 en surface et 7,1 en profondeur. La teneur en carbonates est faible dans tous les profils, et l'effervescence à l'acide est à peine détectable sur le terrain. Elle diminue systématiquement de la surface vers la profondeur (Figure 7). L'analyse aux rayons X de la transition indurée à 29-30 cm blanchâtre entre les horizons A et B1 confirme la présence de calcite (PAF=3,7 %), accompagnée de Quartz, et de muscovite.

Phosphore

La teneur moyenne en phosphore total du sol est de 6,4 mg g⁻¹ de sol entre 0 et 30 cm et décroît à 3 mg de P/g de sol dans l'horizon B1 entre 30 et 50 cm, puis à 2 mg de P/g en B2 (Figure 8).

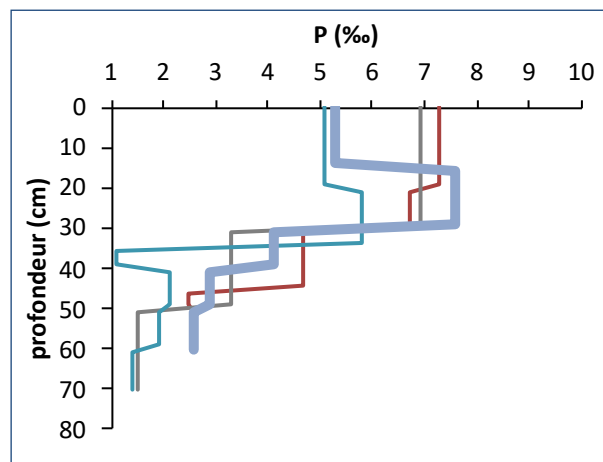
La moyenne du stock de phosphore par profil est de 1,73 kg P.m² ± 1,3. La quantité totale de phosphore estimée au Serre Orel pour une surface totale de 350 m² est de 607 kg.

Observation microscopique

Les excréments sont particulièrement bien conservés dans la première tranche, seuls la laine et les oxalates de calcium ont disparu, les fibres celluloseuses sont encore bien visibles. Les sphérolithes fécaux sont bien conservés dans l'horizon A cor-

Figure 8 : Variation de la teneur en P total (‰) en fonction de la profondeur dans 4 profils.

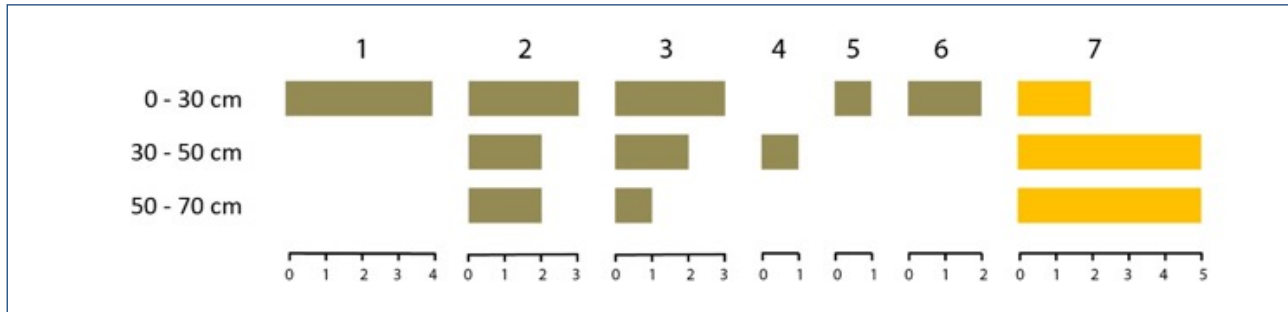
Figure 8: Soil total P content in relation to depth.



respondant à l'accumulation organique, mais ne sont pas présents en dessous (Figure 9). Les phytolithaires sont abondants en surface, et moyennement abondants en profondeur, comme les statospores de Chrysophycées. On observe la présence d'amibes testacées (Rhizopode) en surface, tandis que les diatomées sont absentes. Amibes et statospores de Chrysophycées pourraient provenir des zones humides fréquentées par les bêtes (les diatomées sont sub-absentes). Enfin, on note la présence de quelques micro-charbons, et l'absence totale de cendres de bois.

Figure 9 : Abondance des différents types de poussières dans les trois horizons du profil LR1 centre. 1, sphérolithes fécaux ; 2, phytolithaires siliceux ; 3, statospores de Chrysophycées ; 4, diatomées ; 5, fibres celluloses ; 6, amibes testacées ; 7, poussières détritiques. Échelle semi-quantitative des abondances : 0 = absent, 1 = présent, 2 = rare, 3 = moyen, 4 = abondant et 5 = dominant.

Figure 9: Abundance of different types of dust in the three horizons of profile Centre. 1, faecal spherulites; 2, siliceous phytoliths; 3, Chrysophyceae statospores; 4, diatoms; 5, cellulose fibres; 6, testaceous amoebae; 7, detrital dusts. Semi-quantitative scale of abundance: 0 = absent, 1 = present, 2 = rare, 3 = medium, 4 = abundant and 5 = dominant.



3. DISCUSSION

3.1. Pratiques paysannes anciennes en Oisans (d'après Girel et al., 2010)

Dès le Néolithique, l'installation des premiers agriculteurs est bien établie dans la basse vallée du Drac et dans l'Oisans vers 1000 av. J.C. Une amorce de voie se dessine pour établir le contact avec la Haute Durance (Briançonnais) occupée elle aussi depuis le Néolithique (2000-2500 av. J.C.). Des analyses palynologiques attestent ensuite de la colonisation de nouveaux terroirs d'altitude en Oisans à la fin de l'Âge du Bronze (900-700 av. J.C.). À l'Âge du Fer (700-100 av. J.C.) se produit une forte extension des populations alpines. Cependant, jusqu'à l'an mil on observe une instabilité des paysages, en lien notamment avec la succession de périodes troublées et de périodes de paix synonymes d'accroissements démographiques. Les XI^e et XII^e siècles correspondent à une période d'intensification des activités agropastorales en montagne comme dans les vallées. En Savoie, c'est à la même époque que commence le commerce du bois. Les granges construites autour de La Grave sont connues en tant qu'habitats permanents au XIV^e siècle (Rousset, 1977). La succession continue des terrasses qui couvrent le versant sud de Villar-d'Arènes date aussi probablement de cette période. La déforestation en altitude se développe particulièrement à partir du XVI^e siècle et culmine au XVIII^e siècle. Les terrasses cultivées entre 1 700 et 2 000 m d'altitude sont emblavées suivant un assolement biennal, seigle-jachère. Au-dessus de 2 000 m et jusque vers 2 400 m, les prairies sont fauchées. Entre 1829 et 1840, Villar-d'Arène compte 120 à 130 familles disposant en moyenne de 1,5 ha labourable, et au moins une vache et 10 moutons. Les familles les plus aisées possèdent entre 5 et 7 vaches ou génisses,

jusqu'à 30 moutons ainsi qu'un ou deux mulets et parfois une jument. En 1820, les pâtures de haute altitude nourrissent 328 bovins hivernés et 150 « en pension », plus 1 100 moutons hivernés et 1 300 en pension provenant des vallées proches. Le premier troupeau transhumant de Camargue, qui compte 900 moutons, s'installe sur les pâtures communales de Villar-d'Arène en 1852, et en 1866 la totalité de l'Alpe est affermée pour 1 900 bêtes. Ce troupeau transhumant occupe la partie sommitale des pâtures communales, car les parties basses sont laissées aux bovins. Au cours du XX^e siècle, les prairies de fauche prennent la place des labours. Dès 1930, comparativement à 1828, près de 50 % des terres labourables sont reconverties dans la production herbagère.

Bruno Faure, l'actuel berger transhumant qui vient d'Eguilles (Bouches-du-Rhône) raconte : « Pendant la guerre, au col du Lautaret, la bergerie des couchettes (Figure 1) est brûlée par les repris de justice utilisés par les nazis pour terroriser les gens. C'était une étable à vaches, celles-ci étaient petites du fait du déficit de nourriture. Elles ne dormaient pas sur la butte mais sur un petit replat, et jamais sur une pente. La couchade était probablement utilisée par des troupeaux de moutons des petits propriétaires de la vallée. Quand il y a une tempête, le vent tourbillonne au Serre Orel (en provençal « la montagne du vent ») mais au niveau du sol, sur la petite dépression-replat de la couchade, il n'y a pas de vent, juste de l'air, les moutons y montent naturellement. Ils préfèrent pour les couchades des zones où l'on a de la vue et de l'air, mais pas de vent direct. Depuis 50 ans, le troupeau de 1 000-1 500 moutons y passe 30 nuits par an, en gros »

Ces informations nous ont été complétées par J.-L. Sionnet, agriculteur-éleveur à Villar-d'Arène, auprès de qui B. Faure avait appris son métier de berger. « Du fait du manque de bois dans la vallée, le fumier de mouton accumulé dans les bergeries à la fin de l'hiver et tassé du fait du piétinement était

sorti, découpé en petites briques, puis empilé à l'abri pour le faire sécher. Ce fumier était brûlé, après un minimum d'un an, dans les poêles pour chauffer et cuisiner. Mais le fumier des couchades brûle mal et ne donne pas de chaleur car il est exposé aux intempéries et n'est pas compacté. Quand il n'était pas trop éloigné, ce fumier était récupéré pour mettre dans les prés. Depuis 10 ans, la couchade du serre Orel est abandonnée, à cause du loup mais aussi des touristes qui font fuir le troupeau ». À propos du loup, J.-L. Sionnet raconte : « L'emplacement actuel du hameau des Terrasses (au-dessus de Villar-d'Arène) est en plein vent. Il y a longtemps, il était situé plus haut (où il y a des saules aujourd'hui), là où il n'y a pas de vent (des fondations ont été retrouvées et des fontaines y coulaient, aujourd'hui il y a un captage d'eau à cet endroit). Au-dessus il y avait une forêt. Cette forêt a été brûlée pour éviter que les loups ne s'y cachent. Mais le feu n'étant pas maîtrisé, il s'est propagé et a tout brûlé. Puis l'avalanche est descendue et a rasé le hameau qui par la suite a été reconstruit à son emplacement actuel ».

On doit en déduire que les couchades nocturnes libres, comme celles du Serre Orel, sont pour l'essentiel datées de la fin du XIX^e siècle ou du XX^e, car on ne peut imaginer une communauté d'éleveurs pauvres se laisser distraire une partie du troupeau par le loup.

3.2. Géomorphologie et pédogénèse au Serre Orel

Dans les conditions climatiques du Col du Lautaret, les cambisols oligo et mésosaturés sont généralisés sur les pentes cultivées en terrasses couvrant les terrains sédimentaires du versant sud. Tandis qu'en face Nord dominant les aloctisols et podzosols, sous les landes acidophiles couvrant les moraines et tabliers d'éboulis cristallins du Combeynot.

La présence au col de cette butte témoin de calcaire est surprenante, vu la puissance des appareils glaciaires encore présents du côté du massif de Combeynot. Il semble que les glaciers aient partiellement préservé cette éminence du fait de la dureté relative du calcaire vis-à-vis de l'encaissant marno-gréseux et probablement aussi parce que, se trouvant au col, elle n'a pas subi les poussées des glaciers orientées vers les vallées de la Romanche et de la Guisanne. Plus surprenant encore est la nature du matériel limoneux, dépourvu d'éléments grossiers et de graviers de l'horizon B1. En raison de sa position au col, subissant un contraste climatique violent entre les Alpes du Nord plus fraîches et humides, et les Alpes du Sud plus chaudes, il est possible qu'il provienne d'un dépôt éolien local conditionné par le vent permanent, piégé par la neige et la végétation. On peut aussi imaginer qu'il provienne d'une ancienne activité granulo-sélective des lombriciens anéciques sous couvert ligneux.

3.3. Restitution de matière organique et de nutriments et effet sur le sol

Les stocks de matière organique du sol au Serre Orel - près de 80 kg m⁻², soit près de 40 kg C m⁻² sont très élevés. Les teneurs en MO sont près de trois fois plus élevées que celles des prairies permanentes localisées en exposition Sud sur des substrats similaires au Col du Lautaret (Clément *et al.*, 2012). La valeur extrême de ces stocks de carbone est confirmée dans différents contextes de haute montagne. En Suisse, l'inventaire des stocks de carbone présenté par Leifeld *et al.* (2005) pour les prairies permanentes donne une valeur moyenne de 9 kg C m⁻² pour une épaisseur d'un mètre de sol, et des stocks proche de 5 kg C m⁻² pour les 20 premiers cm, valeur peu variable entre 500 et 2500 m d'altitude. Dans les Pyrénées, Garcia Pausas *et al.* (2007) mesure les stocks de carbone des sols de prairie entre 1900 et 2900 m d'altitude. Ces stocks varient entre 5,9 and 29,9 kg C m⁻² (moyenne ± SE : 15,3 ± 0,9 kg C m⁻²), sans relation simple avec le relief ou l'exposition. Là encore, ces stocks sont très inférieurs à ceux du Serre Orel, et d'autre part le rapport C/N de ces sols est toujours supérieur à 9, là où il est égal à 8 au Serre Orel.

Ces stocks élevés doivent être mis en relation avec le flux de déjections et le pédoclimat très particulier du Serre Orel. Une brebis produit environ 0,5 kg de MS de fèces par jour (Gunary, 1968 ; Rowarth *et al.*, 1988 ; Shand *et al.*, 2005 ; Whitehead, 2000 ; Bloor *et al.*, 2012). Par nuit elle en produirait donc la moitié, c'est-à-dire environ 0,25 kg de MS. Un troupeau de 1000 brebis, séjournant 30 nuits au Serre Orel déposerait environ 7,5 t de déjections sèches sur une surface de 350 m². En regard, la production primaire brute des prairies au col du Lautaret varie entre 200 g.m⁻² (crêtes ventées) et 400 g.m⁻² (prairies mésotrophes à enneigement médian) (Baptist et Choler, 2008), c'est-à-dire entre 0,07 et 0,14 t pour une surface équivalente de 350 m². L'apport de déjection constitue donc une entrée majeure de carbone au sol du Serre Orel. La valeur extrêmement élevée du δ¹⁵N du sol est compatible avec l'apport considérable de déjection (Bol *et al.*, 2005), la volatilisation d'ammoniac appauvrie en ¹⁵N (Lee *et al.*, 2011) à partir de l'urine, et le drainage de nitrate (Clément *et al.*, 2012).

La transition brutale entre les horizons A et B pourrait être liée au gel hivernal du sol, qui limiterait l'activité fongique de la faune. Mais la compacité actuelle de l'horizon B1 pourrait aussi s'opposer à l'activité fongique des lombrics. Cette transition pourrait aussi être liée à une troncature des horizons de surface. Il est en effet possible que cette accumulation ait été exploitée pour fertiliser les sols de culture du versant sud.

Le gel hivernal pendant les mois d'hiver contribue à la conservation de la MO apportée au Serre Orel. Kreyling *et al.* (2013) montre que le gel hivernal du sol, provoqué par élimination expérimentale de la neige, réduit le taux annuel de décomposition de la cellulose de moitié par rapport au sol témoin qui ne gèle pas. Les effets du gel hivernal du sol ont aussi été

étudiés au Col du Lautaret par Baptist *et al.* (2010) en comparant, par la technique des sacs à litière, les sols des crêtes ventées à ceux des combes à neige. Les auteurs montrent que la composition des litières est le premier facteur réglant le taux de décomposition. Mais la décomposition est plus faible sur les crêtes ventées, en raison du gel du sol hivernal. Au Serre Orel, il est probable que la production végétale estivale ne soit pas affectée par le gel hivernal, dans la mesure où la disponibilité en nutriments est très élevée. Par contre, le ralentissement de la décomposition par le gel hivernal est très probable.

L'importance des apports de déjections doit être aussi notée pour le phosphore ou les carbonates. Les déjections ovines contiennent environ 1 % de P et de Ca (Shand *et al.*, 2005; McDowell et Stewart, 2005). Le phosphore est essentiellement (60 à 70 %) sous la forme de phosphate de Ca (brushite) et de phosphate double d'ammonium et de magnésium (struvite) (Gunary, 1968; Shand *et al.*, 2005), partiellement extractible à l'eau (20 %) mais cette fraction diminue lorsque les fèces se dessèchent. Un troupeau de 1 000 brebis, séjournant 30 nuits au Serre Orel déposerait environ 75 kg de P sur une surface de 350 m². À ce rythme, en tenant compte de ce qu'une partie du phosphore est perdue par érosion ou lessivage, le stock de P du Serre Orel (600 kg) pourrait résulter de quelques décennies de fumure. Ce constat est cohérent avec les datations modernes du carbone effectuées sur la transition entre les horizons A et B.

Le calcium qui n'est pas associé au P sous la forme de brushite se trouve aussi sous la forme de calcite, dans des sphérolites, qui se forment dans l'intestin des ovins (Brochier, 1983). Ce flux de calcite explique le taux de carbonate plus élevé dans l'horizon A du sol, alors que celui-ci s'est développé sur un substratum presque entièrement décarbonaté. L'induration de la partie supérieure de l'horizon B est liée à la précipitation de carbonate de Ca, dont l'origine générale paraît être liée à l'apport de carbonate de Ca dans les déjections. La précipitation paraît liée à la discontinuité structurale et porale entre l'horizon A et B, et pourrait être déterminée par le régime hydrique. Pendant l'hiver, la formation de lentilles de glace dans l'horizon A pourrait concentrer les carbonates dans l'horizon B, tandis que l'été le vent favorise la remontée capillaire.

Ces couchades de crêtes illustrent donc un mécanisme de redistribution d'alcalinité et de fertilité du bas du paysage vers le haut, par les troupeaux. Cette redistribution s'oppose à l'acidification générale des sols d'altitude causée par les conditions bioclimatiques générales. En effet, en haute montagne et sous des latitudes tempérées, la pédogénèse se caractérise par une accumulation de matière organique acide favorisée par les basses températures hivernales, et un processus dominant d'acidification, provoqué par l'excès de précipitations et amplifié par l'accumulation de cette matière organique (Jamagne, 2011).

La localisation de ces couchades, en crête ou près des cabanes, au voisinage des points d'eau, a aussi des consé-

quences sur les écosystèmes aquatiques. Le transfert sous forme soluble ou particulaire des nutriments, en particulier du phosphore et de l'azote des fèces vers les lacs d'altitude, favorise la productivité algale, mais aussi la désoxygénation des eaux profondes (Koinig *et al.*, 2002). Le mode actuel de gestion des troupeaux accentue donc ce risque (Lapeyronie et Moret, 2007).

CONCLUSION

En montagne plus qu'ailleurs du fait du relief, l'érosion rajeunit les profils et freine leur développement. Cette action est d'autant plus marquée que les versants ont été déboisés par les activités agropastorales (Combes, 1982; Evans, 1998; Alewell *et al.*, 2015; Torresani *et al.*, 2019). Des témoignages indiscutables de l'augmentation de l'érosion, associés au déboisement des montagnes pour le pâturage, sont enregistrés dans les sédiments des lacs et des tourbières d'altitude dès l'Âge du Bronze (Arnaud *et al.*, 2016), durant la période romaine, le Moyen Âge et surtout au cours des XVIII^e et XIX^e siècles (Mougin, 1931; Bajard, 2017).

Au cours du XIX^e siècle, les gestionnaires des espaces montagnards avertis de ces risques ont défini les règles d'un équilibre agro-sylvo-pastoral, limitant l'érosion, conservant la fertilité des sols et favorisant la régénération des forêts (Ecole de le Play et contradicteurs, voir Métailié (1993) pour une bibliographie étendue). Pâturage tournant, troupeaux guidés, successions ovins-bovins-équidés, faibles charges animales et protection des points d'eau en font partie. Dans ces mesures se trouve sous forme implicite l'idée que les troupeaux peuvent (et doivent) servir à conserver voire à élever la fertilité des pâturages d'altitude, si leur gestion est contrôlée. Comme dans tous les systèmes d'élevage, la gestion des fèces est le pivot de la conservation de la fertilité des sols.

Les sols des couchades nocturnes illustrent cette idée. La biomasse broutée et les nutriments qu'elle contient y sont restitués et ceci provoque un enrichissement exceptionnel du sol. La position sur une crête, choisie par le troupeau en l'absence de contrainte par un prédateur, y provoque une formidable accumulation de matière organique en surface. Cette situation n'est pas exceptionnelle. Pellet (1983; 1986) dénombre 8 reposoirs dans la vallée du Chazelet à La Grave, dont 5 se situent sur des crêtes. Une visite de ces reposoirs nous a confirmé qu'ils étaient aussi le lieu de formidables accumulations de matière organique. Dans d'autres massifs des Alpes du Nord, des reposoirs de crête ont été visités et suggèrent que ces curiosités sont assez courantes en haute montagne.

Ces sites de crête sont ainsi les témoins d'une organisation agropastorale de l'espace, qui n'était probablement pas de mise avant le XIX^e siècle et disparaît actuellement avec le retour du Loup. Après le troupeau et le vent, le Loup apparaît

ici, en négatif, comme un agent de la pédogénèse et de la distribution spatiale de la fertilité dans les Alpes !

REMERCIEMENTS

Nous remercions Michel Meuret et Jacky Girel pour des discussions souriantes et fructueuses, ainsi que les berger-éleveurs Bruno Faure et J.-L. Sionnet, qui nous ont amicalement reçus et fourni les informations indispensables à l'écriture de cette fable.

BIBLIOGRAPHIE

- Alewel C., Egli M., Meusburger K. (2015). An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. *Journal of Soils and Sediments*, 15(6), pp. 1383-1399.
- Arnaud F., Poulénard J., Giguet-Covex C., Wilhelm B., Révillon S., Jenny J. P., Sabatier P. (2016). Erosion under climate and human pressures: An alpine lake sediment perspective. *Quaternary Science Reviews*, 152, pp. 1-18.
- Aubert S., Bec S., Choler P., Douzet R., Michalet R., Thuiller W. (2011). Flore et végétation de la région du Lautaret et du Briançonnais - Partie 1 : Eléments d'écologie alpine. *Les Cahiers illustrés du Lautaret: Station Alpine Joseph Fourier*.
- Baize D. (2000). Guide des analyses en pédologie: choix, expression, présentation, interprétation. Paris: INRA Editions
- Bajard M. (2017). Trajectoires d'évolution des sols et des agroécosystèmes de montagne de l'Holocène à l'Anthropocène Reconstitution des pédopaysages des Alpes du Nord occidentales à partir d'archives sédimentaires lacustres. Thèse Université Savoie Mont Blanc. 264 p.
- Baptist F. (2008). Impact de la durée d'enneigement sur les cycles biogéochimiques dans les écosystèmes alpins. Thèse. Université Grenoble Alpes. 264 p.
- Baptist F., Choler P. (2008). À simulation of the importance of length of growing season and canopy functional properties on the seasonal gross primary production of temperate alpine meadows. *Annals of botany*, 101(4), pp. 549-559.
- Bloor J.M.G., Jay-Robert P., Le Morvan A., Fleurance G. (2012). Déjections des herbivores domestiques au pâturage: caractéristiques et rôle dans le fonctionnement des prairies. *Prod. Anim.* 25 (1), pp. 45-56.
- Bol R., Eriksen J., Smith P., Garnett M.H., Coleman K., Christensen B.T. (2005). The natural abundance of ^{13}C , ^{15}N , ^{34}S and ^{14}C in archived (1923–2000) plant and soil samples from the Askov long-term experiments on animal manure and mineral fertilizer. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 19(22), pp. 3216-3226.
- Browns J.E. (1971). Sheep Behavior under Unherded Conditions on Mountain Summer Ranges. *Journal of Range Management*, 24, pp. 105-109.
- Brochier J.-É. (1983). Combustions et parcage des herbivores domestiques. Le point de vue du sédimentologue. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 80, (5), pp. 143-145.
- Brochier J.-É. (2002). Les sédiments anthropiques. Méthodes d'étude et perspectives. In J.-C. Miskovsky : Géologie de la Préhistoire : méthodes, techniques, applications, Paris, pp. 453-477.
- Brochier J.-É. (2006). Des hommes et des bêtes: une approche naturaliste de l'histoire et des pratiques de l'élevage. In Jean Guilaine. Populations néolithiques et environnements. *Errance*. pp. 137-152.
- Clément J.C., Robson T.M., Guillemin R. *et al.* (2012). The effects of snow-N deposition and snowmelt dynamics on soil-N cycling in marginal terraced grasslands in the French Alps. *Biogeochemistry* 108, pp. 297–315
- Combes F. (1982). Réflexions sur les problèmes d'érosion dans les Alpes de Haute-Provence. *Revue forestière française*, 34(1), pp. 61-76.
- Dobremez J.F., Ozenda P., Tonnel A., Vigny F., Gensac P., Pautou G., Richard L. (1974) Carte de la végétation potentielle des Alpes Nord-Occidentales (partie française). Documents de cartographie écologique 13, pp. 9-27.
- Evans R. (1998). The erosional impacts of grazing animals. *Progress in Physical Geography*, 22(2), pp. 251-268.
- Favier R. (2002). La monarchie et la lutte contre les loups en Dauphiné dans la seconde moitié du XVIII^e siècle. *Le Monde alpin et rhodanien. Revue régionale d'ethnologie*, 30(1), pp. 117-124.
- Garcia-Pausas J., Casals P., Camarero L., Huguet C., Sebastia M.-T., Thompson R., Romanyà J. (2007). Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: Effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 82, pp. 279-289.
- Girel J., Quéfier F., Bignon A., Aubert S. (2010). Histoire de l'agriculture en Oisans: Haute Romanche et pays faranchin: Villar d'Arène, Hautes-Alpes. *Les Cahiers illustrés du Lautaret: Station Alpine Joseph Fourier*. ISBN 978-2-9535562-0-9
- Gunary D. (1968). The availability of phosphate in sheep dung. *The Journal of Agricultural Science*, 70, pp. 33-38.
- Hocquette J.-F., Vermorel M., Bouix J., Anglaret Y., Donnat J., Léoty C., Souchet R. (1992). Influence du froid, du vent et de la pluie sur les dépenses énergétiques et la thermorégulation de sept types génétiques de brebis. *Genetics Selection Evolution*, 24(2), pp. 147-169.
- Jamagne M. (2011). Grands paysages pédologiques de France. Editions Quæ, 536 p.
- Koinig K.A., Kamenik C., Schmidt R., Agustí-Panareda A., Appleby P., Lami A., Psenner R. (2002). Environmental changes in an alpine lake (Gossenköllesee, Austria) over the last two centuries—the influence of air temperature on biological parameters. *Journal of Paleolimnology*, 28(1), pp. 147-160.
- Kreyling J., Haei M., Laudon H. (2013). Snow removal reduces annual cellulose decomposition in a riparian boreal forest. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(4), pp. 427-433.
- Lapeyronie P., Moret A. (2007). Protection des troupeaux et impacts environnementaux. Loup Elevage, s'ouvrir à la complexité (L. Garde Ed.), pp. 202-211.
- Lee C., Hristov A. N., Cassidy T., Heyler K. (2011). Nitrogen isotope fractionation and origin of ammonia nitrogen volatilized from cattle manure in simulated storage. *Atmosphere*, 2(3), pp. 256-270.
- Leifeld J., Bassin S., Fuhrer J. (2005). Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(1), pp. 255-266.
- McDowell R.W., Stewart I. (2005). Phosphorus in fresh and dry dung of grazing dairy cattle, deer, and sheep: Sequential fraction and phosphorus-31 nuclear magnetic resonance analyses. *Journal of environmental quality*, 34(2), pp. 598-607.
- Métailié J.P. (1993). De la géographie des forestiers à la géographie contre les forestiers. La diffusion et l'extinction du concept de dégradation des montagnes, à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e. In: *Autour de Vidal de la Blache, la formation de l'école française de géographie*. P. CLAVAL ed. CNRS. pp. 101-108.
- Meuret M. (2010). Un savoir-faire de bergers. Editions Quæ, 336 p.
- Meuret M., Garde L., Moulin C.H., Nozières-Petit M.O., Vincent M. (2017). Élevage et loups en France: historique, bilan et pistes de solution. *INRA Productions animales*, 30(5), pp. 465-478.
- Molinier A. (2002). Une cartographie des loups tués en France et dans les territoires sous contrôle français vers 1800. Jalons pour une écologie des loups. *Le Monde alpin et rhodanien. Revue régionale d'ethnologie*, 30(1), pp. 101-116.

- Molinier A., Molinier-Meyer N. (1981). Environnement et histoire: les loups et l'homme en France. *Revue d'histoire moderne et contemporaine* 28(2), pp. 225-245.
- Mooring M.S., Fitzpatrick T.A., Fraser I.C., Benjamin J.E., Reisig D.D., Nishihira T.T. (2003). Insect-defense behavior by desert bighorn sheep. *The Southwestern Naturalist*, 48(4), pp. 635-643.
- Mougin P. (1931) La restauration des Alpes. Ed. du Ministère de l'Agriculture, Direction générale des Eaux et Forêts, Eaux et Génie rural. Paris, 584 p.
- Mysterud A., Iversen C., Austrheim G. (2007). Effects of density, season and weather on use of an altitudinal gradient by sheep. *Appl Anim Behav Sci*, pp. 104-113.
- Pellet G. (1983). Etude pastorale d'un alpage de l'Oisans : impact d'un troupeau ovin sur la végétation. Mémoire de DEA, Université Grenoble Alpes. 44 p.
- Pellet G. (1986). Phytoécologie, phytosociologie et potentialités fourragères des pelouses d'altitude en Oisans (Alpes françaises) - Application à la vallée du Chazelet (La Grave, Hautes-Alpes). Thèse Université Grenoble Alpes. 107 p.
- Reimer R.W., Reimer P.J. (2022). CALIBomb [WWW program] at <http://calib.org> accessed 2022-3-7.
- Rousset P.-L. (1977). Au pays de la Meije. 3^e édition (1992), Curandera (Voreppe), 399 p.
- Rowarth J.S., Gillingham A.G., Tillman R.W., Syers J.K. (1985). Release of phosphorus from sheep faeces on grazed, hill country pastures. *New Zealand journal of agricultural research*, 28(4), pp. 497-504.
- Savini I., Landais E., Thinon P., Deffontaines J.P. (1993). L'organisation de l'espace pastoral. *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, pp. 137-160.
- Shand C.A., Coutts G., Hillier S., Lumsdon D., Chudek A., Eubeler J.P. (2005). Phosphorus Composition of Sheep Feces and Changes in the Field Determined by ³¹P NMR Spectroscopy and XRPD. *Environmental Science & Technology*, 39, pp. 9205-9210.
- Torresani L., Wu J., Masin R., Penasa M., Tarolli P. (2019). Estimating soil degradation in montane grasslands of North-eastern Italian Alps (Italy). *Heliyon*, 5(6), pp. 1-12.
- Turquin O., Lebaudy G. (2015). *Petit Manuel du Berger d'Alpage*. Cardère. 240 p.
- Whitehead D.C. (2000). *Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationships*. Cabi.
- Ward G.K., Wilson S.R. (1978). Procedures for comparing and combining radiocarbon age determination: a critique. *Archaeometry* 20(1), pp. 19-34.