

Buttes gazonnées alpines :

Une formation principalement attribuable à l'exploitation pastorale ?

J.-P. Legros^(1*), B. Mourier⁽²⁾, J. Poulenard⁽³⁾ et E. Dambrine⁽⁴⁾

1) Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 1 B rue de Verdun 34000 Montpellier, France

2) Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ENTPE, UMR 5023 LEHNA, 3 rue Maurice Audin 69518 Vaulx-en-Velin cedex, France

3) Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000, Chambéry, France

4) INRAE, Université Savoie Mont-Blanc, CARRTEL, 74200, Thonon-Les-Bains, France

* Auteur correspondant : paul-jean.legros@orange.fr

RÉSUMÉ

Dans les alpages des montagnes de la zone tempérée, on observe souvent des buttes gazonnées qui ressemblent aux earth hummocks présents principalement sous les hautes latitudes. Toutefois les conditions thermiques sont différentes. Dans les Alpes et les Pyrénées, il manque le pergélisol, les coins de glace et les phénomènes de cryoturbation généralement associés à ces formes dans l'Arctique. Nous proposons ici l'hypothèse que les sols alpins, au printemps et à l'automne, sont constitués d'une mince couche superficielle imperméable et plus ou moins rigide (mat racinaire, gel) tandis que dessous le sol est humide et plastique. Ceci favorise alors sa déformation (creux et bosses) par le piétinement du bétail. Cette hypothèse, établie par analogie avec ce qu'on observe sur les routes du Grand Nord en période de dégel, s'appuie sur de très nombreux arguments morphologiques, micromorphologiques, et est confortée par les positions de ces reliefs bosselés sur le terrain. Mais il n'y a pas encore de preuve directe, faute d'expérimentations relevant de la mécanique des sols.

Mots-clés

Sols, thufurs, buttes gazonnées, Alpes, alpages, prairies alpines

SUMMARY

**MOUNDS (HUMMOCK-LIKE) SEEN IN ALPINE MEADOWS:
A formation primarily attributable to pastoral farming?**

In the mountain pastures of temperate zones, grassy mounds are often observed that resemble the earth hummocks found mainly in high latitudes. However, the thermal

Comment citer cet article :

Legros J.-P., Mourier B., Poulenard J. et Dambrine E., 2026 - Buttes gazonnées alpines : une formation principalement attribuable à l'exploitation pastorale ? Étude et Gestion des Sols, 33, 85-102

conditions are different. In the Alps and Pyrenees, there is no permafrost, ice pockets or cryoturbation phenomena generally associated with these formations in the Arctic. We propose here the hypothesis that, in spring and autumn, alpine soils consist of a thin, impermeable and more or less rigid surface layer (root mat, frost) whilst the soil beneath is moist and plastic. This then encourages its deformation (hollows and bumps) due to trampling by livestock. This hypothesis, established by analogy with what is observed on roads in the Far North during the thaw, is supported by numerous morphological and micromorphological arguments, and is reinforced by the positioning of these bumpy relief features on the ground. However, there is still no direct evidence, due to a lack of experiments in soil mechanics.

Key-words

Soils, Earth hummocks, Alps, mountains pastures, alpine meadows

RESUMEN**MONTÍCULOS CUBIERTOS DE CÉSPED ALPINO: ¿Una formación debida principalmente al pastoreo?**

En los pastos alpinos de las montañas de la zona templada, a menudo se observan montículos cubiertos de hierba que se asemejan a los montículos de tierra presentes principalmente en las latitudes altas. Sin embargo, las condiciones térmicas son diferentes. En los Alpes y los Pirineos no hay permafrost, esquinas de hielo ni fenómenos de crioturbación, que suelen asociarse a estas formas en el Ártico. Planteamos aquí la hipótesis de que los suelos alpinos, en primavera y otoño, están formados por una fina capa superficial impermeable y más o menos rígida (matriz radicular, hielo), mientras que por debajo el suelo es húmedo y maleable. Esto favorece entonces su deformación (hollos y bultos) por el pisoteo del ganado. Esta hipótesis, establecida por analogía con lo que se observa en las carreteras del Gran Norte en época de deshielo, se apoya en numerosos argumentos morfológicos y micromorfológicos, y se ve reforzada por la disposición de estos relieves abultados sobre el terreno. Sin embargo, aún no hay pruebas directas, debido a la falta de experimentos relacionados con la mecánica del suelo.

Palabras clave

Suelos, Césped almohadillado, Alpes, pastos de montaña, prados alpinos

Dans les pelouses d'altitude de nos montagnes (pelouses alpines), ainsi que dans la toundra des régions nordiques de la Planète, on observe des buttes gazonnées, hautes de deux à trois décimètres, de forme arrondie et plus ou moins dispersées. Pour fixer immédiatement les idées, une illustration est fournie (Photo 1).

Cette double occurrence, montagnaise et arctique, suggère que le froid et plus précisément le gel est en cause dans l'apparition de ces buttes. Nous présenterons des éléments allant dans ce sens. Mais cela ne suffit pas, selon nous, pour conclure que les mécanismes de formation sont identiques dans les deux situations géographiques, même si de très nombreux auteurs ont pu le supposer en raison de la similarité apparente des formes observées et de certaines convergences climatiques. Nous serons donc amenés, dans une première partie, à comparer ces formes, leurs climats respectifs et plus généralement leurs conditions d'apparition. Dans une seconde partie nous examinerons les mécanismes de formation : bien établis dans les hautes latitudes, mais plus hypothétiques en contexte montagnard tempéré où nous mettons l'accent sur le rôle du bétail. En troisième partie, nous présenterons les observations de terrain qui appuient nos hypothèses. Enfin, dans une quatrième partie, nous discuterons des éléments de physique des matériaux susceptibles de rendre notre interprétation plausible.

Au-delà de l'analyse bibliographique et de nos travaux propres, nous nous sommes largement appuyés sur des images de l'IGN et de Google Earth, dont la résolution peut atteindre 20 cm. Les bosses sont particulièrement visibles lorsque les clichés ont été pris avec une lumière légèrement rasante, ce qui permet des observations auparavant difficiles, voire impossibles.

1. MORPHOLOGIE ET ÉCOLOGIE DES DIFFÉRENTS TYPES DE BUTTES GAZONNÉES

1.1 Terminologie

Toutes sortes d'appellations ont été utilisées pour caractériser ces bosses dont le cœur est fait de terre fine et dont la surface est pour l'essentiel constituée de Poacées. Le terme « *thufur* », d'origine islandaise a été utilisé pour caractériser les bosses des Alpes par les auteurs allemands, tchécoslovaques et français (Carbiener, 1966). Au singulier c'est Thufa. Donc, ajouter un « s » à thufur est redondant mais acceptable en français. Les vocables allemands « *buckelwiese* » (= prairie bosselée ; « *bukkelwiesen* » au pluriel) et Bülten sont équivalents à thufa/thufur. En Espagne, ce sont les « *Césped almohadillado* ». En français, on a utilisé l'appellation « *buttes gazonnées* ». En effet, dans les Alpes, ces formes s'observent

Photo 1 : Buttes gazonnées, dans le Beaufortain (France), au-dessus du col des Saisies dans les Alpes. Pente de 10 à 20 %, altitude de 1950 m. © JP Legros, 1981

Photo 1: Grassy hills in Beaufortain (France), above the Col des Saisies in the Alps. Slope of 10 to 20%, altitude 1,950 m. © JP Legros, 1981



dans les pelouses d'altitude. Dans la communauté anglophone, on emploie « *earth hummock* ». Une synthèse donne des détails sur ces appellations (Keller-Pirkbauer *et al.*, 2022).

À côté de ces formes assez bien identifiées, il en est d'autres qui ne partagent avec les précédentes que leur petite taille (décimétrique ou métrique), leur forme arrondie dans le plan vertical et leur aspect circulaire vu de dessus. Les « *pounus* » sont de petites buttes formées principalement de tourbe (Van Vliet-Lanoë et Seppälä, 2002). Les *palses* sont en tourbe aussi, mais plus grosses. Par ailleurs, aux très hautes latitudes avec permafrost continu, les « *frost boils* » sont des structures plus ou moins bosselées mais dont le cœur est fait de terre nue (Peterson *et al.*, 2003 ; Peterson et Krantz, 2007). Elles sont aussi appelées *frost scars* (cicatrices liées au froid), *mud boils* ou *mud circles*. On les trouve parfois en montagne tempérée, par exemple, dans les Pyrénées où elles ont été qualifiées d'*ostioles terreuses* (Soutadé, 1980). Elles sont attribuées à la cryoturbation.

1.2 Conditions d'apparition des buttes gazonnées

1.2.1 Régime thermique

Le gel est classiquement évoqué comme cause principale de l'apparition de ces formes et force est de constater que les earth hummocks s'observent seulement là où il intervient.

Aux hautes latitudes, on trouve les buttes en Alaska, Canada, Russie, etc. (Raynolds *et al.*, 2008). En revanche, dans le très grand nord désertique, froid et sec, les buttes gazonnées ne sont pas observées. En conséquence, cela suggère que leur

Tableau 1 : Données climatiques de quelques régions où l'on trouve des buttes gazonnées (par ordre de température moyenne croissante).
Table 1: Climate data for some regions where grassy mounds are found (sorted by increasing average temperature).

Lieu	Altitude en m	P moy. annuelle en mm	T moy. annuelle en d°C	Nombre de jours de gel
Hummocks arctiques				
Exemple : Rives du Mackenzie Canada (ECG, 2009)	20	120-400	-10°/-4°	> 200
Buttes gazonnées de type alpin				
Melrakkaslétta nord Islande (Owczarek et al., 2018)	20	1007	2°	180
Mansfiel Colorado USA (Smith, 2011)	2470	392	2,9°	234
Mont Kosciuszko Australie (Costin et Wimbush, 1973)	1900	3000	3°	50 à 80
Col du Petit St Bernard, F [le présent article]	2200	2292	Estimé 1°	Estim. 210
Col des Saisies Beaufortain F (Dambrine, 1981)	1700	1600	4°	162
Ponor Serbie (Milošević et al., 2022)	1400	814	4°/6°	110
Dartmoor Nat. Park UK (Killinberg et Ballantyne, 2012)	450	1974	8°	45

formation nécessite un dégel à la belle saison et un recouvrement végétal suffisant.

Par ailleurs, tous les massifs montagneux des contrées plus ou moins tempérées sont concernés par les reliefs bosselés, tant dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord.

Mais on observe aussi ces formes à faible altitude et pour des latitudes modérées dans les climats continentaux à hiver froid, par exemple au sud de la Russie (Ryabukha et al., 2021).

Le cas des landes du Parc National de Dartmoor, au sud de l'Angleterre, pose problème. À environ 400 m d'altitude, il y a des bosses, alors que le climat est très océanique. La température annuelle de l'air (MAAT) est voisine de 9°C et la température moyenne du mois de janvier reste supérieure à 0°C (Killingbeck et Ballantyne, 2012). Cependant, la région connaît tout de même quelques jours de fort gel chaque année (jusqu'à -6 degrés C).

En résumé, à l'échelle mondiale, on trouve les buttes dans les climats de type polaire, montagnard et continental. Elles apparaissent en sus sous climat océanique frais (Tableau 1).

Notons que, faute de mieux, on se réfère ici à la température de l'air et pas à celle du sol. Mais les deux sont en relation étroite comme l'indiquent les concepts de FDD (*Freezing Degree Days*) et de FI (*Freezing Index*) (MAA, 2006 ; Choler, 2018 ; Loranger et al., 2017).

1.2.2 Matériaux constitutifs

Les observations montrent que ces buttes se développent uniquement sur des matériaux à texture fine. Les sols concernés contiennent une bonne proportion de limons (*silty soils*), voire d'argiles. Au contraire, les sols essentiellement sableux ou graveleux ne sont pas affectés. Dans les Alpes, on rencontre ces buttes préférentiellement sur les schistes (Milošević et al., 2015) et aussi calcschistes, par exemple en Beaufortain (Dambrine, 1981). On les observe aussi sur diverses roches volcaniques qui

Tableau 2 : Dimensions des Hummocks et buttes gazonnées alpines.

Table 2: Dimensions of hummocks and alpine grassy mounds.

	Hummocks (hautes latitudes)	Buttes gazonnées alpines
Largeur (cm)	100-300/400	50-150/200
Hauteur (cm)	20-100	20-50/80
Espacement (cm)	200-300	100-300

donnent des sols fins, par exemple en Islande (Van Vliet-Lanoë et al., 1998) ou dans les Rocheuses (Scotter et Zoltai, 1982). Ces buttes se rencontrent également sur les loëss (Grab, 2005) et sur les terrasses marines riches en éléments fins dans le Grand Nord (Ping et al., 2008). Les calcaires marneux sont également concernés (observation des auteurs). En revanche, elles sont pratiquement absentes sur granite (Killingbeck et Ballantyne, 2012) et absentes sur la plupart des moraines sauf sur les « tills » qui sont des dépôts glaciaires fins (Verret et al., 2019).

La nécessité de matériaux fins pour l'apparition de ces buttes est traditionnellement mise en relation avec le mécanisme de formation impliquant des lentilles ou couches de glace. Celles-ci ne se forment ni dans les sols très imperméables où l'eau circule mal, ni dans les sols très filtrants et bien drainés.

1.2.3 Modelé

Les buttes s'observent un peu partout quand la pente est absente ou faible. Parfois, elles se cantonnent en bas de pente et dans les ensellements (Photo 2). Dans les Alpes, les cols sont concernés presque systématiquement quand leur altitude et leur substrat sont convenables.

Photo 2 : Refuge du Fay, plateau d'Emparis (La Grave, près du col du Lautaret), altitude 2260 m, photo Google Earth du 28/09/2018. On voit bien que les bosses colonisent de légers ensellements topographiques. © Google Earth.

Photo 2: Refuge du Fay, Emparis plateau (La Grave, near the Col du Lautaret), altitude 2,260 m, Google Earth photo from 09/28/2018. It is clear to see that the bumps colonize slight depressions in the terrain. © Google Earth.



1.2.4 Dimensions

Nous avons demandé à trois systèmes différents d'intelligence artificielle de rechercher les dimensions de ces formes dans toute la littérature accessible. Le *tableau 2* rend compte des résultats obtenus. Le second chiffre après le slash indique un maximum plutôt rare.

Ainsi, les hummocks pourraient-ils être plus grands, sans que cela soit systématique.

1.2.5 Végétation

Les buttes gazonnées sont couvertes par un tapis végétal continu. Dans nos montagnes, pour l'essentiel, il s'agit de Poacées, par exemple le Nard raide sur le plateau d'Emparis (Collectif, 2019). Mais on y trouve aussi des mousses, lichens, myrtilles, aïrelles, parfois genévriers. Dans les creux inter-bosses se plaisent des espèces appréciant les conditions plus humides et riches, comme la gentiane pourpre, la benoîte des montagnes, l'épervière orangée (Beaufortain : Dambrine, 1981). Il est évident que le microrelief induit une différenciation marquée de la végétation : dessèchement des points hauts lié au soufflage de la neige donc plus faible protection contre le froid, transfert des nutriments et moins d'acidification dans les creux. Au total, sur un secteur donné, les thufurs peuvent abriter de concert jusqu'à trois ou quatre associations végétales distinctes organisées en

micro-mosaïques et dont les surfaces élémentaires respectives n'excèdent souvent pas quelques décimètres carrés (Villaret et al., 2019).

Les hummocks des hautes latitudes sont localisés dans la toundra, au bord de l'Océan glacial arctique et aussi un peu plus au sud, dans la partie nord de la taïga telle qu'on l'observe en Scandinavie ou en Russie par exemple. Dans la toundra, on trouve des Poacées, mousses, lichens et Carex. Dans la taïga, il s'agit d'éricacées surmontées d'épinettes (petits résineux avec une ramure réduite au minimum).

1.2.6 Age

Les données disponibles ne fournissent que des indications indirectes sur l'âge des champs de bosses.

Certains auteurs mesurent l'âge du carbone incorporé. Mais on peut évidemment avoir un carbone ancien et un soulèvement récent du sol ou le contraire. Le seul cas probant est celui de bandes organiques à la fois internes au sol et déformées par la cryoturbation. Alors il est certain que la matière organique est plus vieille que la déformation ce qui permet de fixer un âge maximal pour la surrection du sol. Il a ainsi été démontré que les formes trouvées dans les montagnes rocheuses ont un âge inférieur à 3000 ans (Scotter et Zoltai, 1982). Dans un autre cas, on a observé des buttes gazonnées venues s'installer sur des

structures anthropiques de 3000 ans (Killingbeck et Ballantyne, 2012). Ceci montre, au moins dans les cas cités, que les buttes correspondantes ne sont pas très anciennes et ne se sont pas formées pendant la dernière glaciation.

L'hypothèse de formes très anciennes et fossiles peut d'ailleurs être discutée car elle néglige la tendance des sols à se remettre naturellement à plat : forces de pesanteur (Thompson *et al.*, 2022), élasticité même partielle du sol, micro-érosion qui bouche les creux (Owczarek *et al.* 2018).

On conclut de tout cela que de tels petits reliefs subsistent dans la durée seulement ou surtout si les forces qui les fabriquent restent à l'œuvre (Hallet, 2013).

Par ailleurs, les spécialistes des hautes latitudes s'accordent pour dire que les buttes peuvent disparaître brutalement par échauffement et dégonflement du sol en cas d'incendie quand celui-ci contient des lentilles de glace (Harris, 2018).

Enfin certains observateurs, particulièrement des paysans, expliquent - et les chercheurs rapportent - que les buttes, dans certains cas, reviennent en quelques années seulement après avoir été aplanies. Il ne faudrait que 10 ans ou 20 ans pour les former (Schunke et Zoltai, 1988 ; Van Vilet-Lanoë *et al.*, 1998 ; Harris, 2022). Dans le Massif Central, l'un de nous a entendu un éleveur dire la même chose. Donc, la formation sous climat périglaciaire ne s'impose pas dans tous les cas.

2. MÉCANISMES DE FORMATION

2.1 Formation des hummocks sous les hautes latitudes

La formation des hummocks est complexe et n'est peut-être pas encore complètement décryptée. La question a été abordée il y a déjà 70 ans (Washburn, 1956 in Sawyer, 2012). Depuis les multiples hypothèses de formation ont été listées (Grab, 2005). Par ailleurs, de nombreuses modélisations ont été conduites concernant la formation des bosses (Walker *et al.*, 2008). Mais ces modélisations ne sont aucunement des démonstrations ; elles disent simplement : le mécanisme simulé est susceptible de former des bosses ressemblant à celles que l'on voit dans la nature.

Même s'il est un peu risqué de choisir, nous allons présenter ici le schéma de formation le plus probable. Il est conforté par des observations et expérimentations. En préalable, il faut préciser un point de terminologie. Classiquement, en zone froide, on observe dans le terrain deux couches. La couche supérieure dégèle et regèle de manière saisonnière. Les Français la nommaient mollisol mais le terme sert aussi pour la classification américaine des sols. Il faut préférer « couche active » ou *active layer* en anglais. Dessous, le *permafrost* ou *pergélisol*, est défini par sa température : le terrain est gelé au

moins pendant deux années consécutives. Son épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres en fonction du climat, en relation bien sûr avec la latitude.

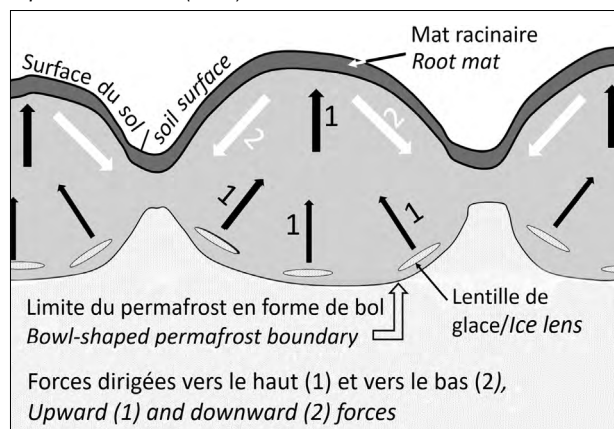
Il faut distinguer deux étapes dans la formation des hummocks.

La première est la fissuration du sol sous l'effet du gel. On sait que tout solide se rétracte quand la température baisse et cela vaut aussi pour un sol gelé. Il apparaît alors un réseau de fissures par *frost cracking*. Dans le Grand Nord et parfois en altitude dans les montagnes tempérées, ce réseau a généralement une allure hexagonale ou pentagonale et conduit à l'apparition de *sols polygonaux*. La distance de centre à centre, entre deux polygones voisins, est de 15 à 20 m dans l'Arctique et de 1 ou 2 m dans les Alpes. Ainsi donc, les structures de l'Arctique, sont-elles parfaitement observables avec Google Earth. Mais on voit moins une fissuration plus fine, hexagonale elle aussi, qui redivise ces polygones décimétriques en polygones plus petits, à développement métrique ou même décimétrique. Et ce sont ces structures fines, généralement de second ordre qui nous intéressent ici. Notons que cet emboîtement presque systématique de structures de dessiccation ou cryodessiccation est facilement visible dans les terrains dépourvus de végétation, par exemple sur la planète Mars ou dans les sols salés terrestres. Au printemps, le sol s'assèche et une croûte apparaît superficiellement. Les graines qui tombent à sa surface ne germent pas, sauf si elles sont poussées dans les fissures par le vent (Raynolds *et al.*, 2008). Alors elles peuvent se développer.

La seconde étape intervient alors. L'hétérogénéité de surface a une importante conséquence, au moins sous les hautes latitudes. En été, le sol chauffe davantage le cœur des polygones que leurs bords protégés du soleil par la végétation. C'est d'autant plus vrai que le sol est souvent organique c'est-à-dire un peu sombre. Le différentiel thermique mesuré est de l'ordre de deux degrés (Walker *et al.*, 2008 ; Raynolds *et al.*, 2008). Mais cela suffit pour que la couche active soit plus épaisse au milieu du polygone. C'est le bowl shaped-permafrost ou permafrost en forme de bol (Peterson *et al.*, 2003 ; Kokelj *et al.*, 2007 ; Raynolds *et al.*, 2008 ; Jones *et al.*, 2009 (son atlas pages 13 et 20), etc.). La profondeur de la cuvette au toit du permafrost peut atteindre 20 ou 25 cm (Walker *et al.*, 2008). Ensuite, la couverture végétale se refermerait par colonisation progressive à partir des bords (Haugland, 2004). Une autre hypothèse attribue la forme en alvéoles du toit du permafrost à des hétérogénéités : texture, humidité, taches de végétation. A la belle saison le réchauffement de la surface se ferait irrégulièrement par taches, et cela se propagerait en profondeur dans le pergélisol. Lorsque les froids reviennent, la couche active commence à regeler à partir de la surface du sol mais aussi depuis le permafrost qui constitue une paroi froide. En effet, il se forme de fines lentilles de glace qui s'accroissent par cryosuccion. En d'autres termes, le gel assèche le terrain, l'eau se déplace en direction des zones ainsi rendues moins

Figure 1 : Schéma de fabrication des hummocks (dessin fait pour cet article à partir des données de la littérature). C'est l'équilibre model de MacKay (1980).

Figure 1: Hummock formation diagram (drawing created for this article based on data from the literature). This is MacKay's equilibrium model (1980).



humides et regèle lorsqu'elle atteint la glace. Les spécialistes font remarquer que l'eau reste en surfusion dans les pores fins continuant ainsi d'être fonctionnels et d'acheminer le liquide à température négative. Cela explique pourquoi ces lentilles de glaces affectent préférentiellement les sols à porosité forte mais fine, donc les limons. Mais ces lentilles ne se disposent pas à plat. Elles apparaissent parallèlement aux limites incurvées du permafrost (MacKay, 1980). Il en résulte que les forces de pression, liées à la cristallisation de la glace et à l'augmentation de volume qu'elle provoque, sont dirigées en oblique c'est-à-dire à la fois vers l'intérieur et vers le haut (figure 1). Ces lentilles de glace, très minces et très peu épaisses au début, croissent et affectent ensuite tout le niveau actif. Le sol monte (frost heaving ou differential heaving) et des bosses apparaissent. Quand le phénomène est enclenché, la neige est moins épaisse en hiver sur les bosses, en particulier à cause du vent. Ces bosses se refroidissent davantage que les inter-bosses ce qui permet au phénomène de se renforcer (Jabłońska, 2022).

Les mesures montrent que le sol peut ainsi s'élever de 8, 10 cm et parfois même de 18 ou 20 cm en un seul hiver (Peterson *et al.*, 2003 ; Walker *et al.*, 2008). Au printemps, il y a effondrement mais la plasticité n'est pas assez grande pour que le terrain retourne à sa forme initiale. Après quoi le cycle recommence. L'élévation trouve rapidement sa limite par suite de la pesanteur qui tend à contrecarrer la poussée vers le haut (flèches blanches sur la figure 1). Au total, à l'équilibre, les bosses ne dépassent pas 30 ou 35 cm en moyenne.

Ce mécanisme laisse jusqu'à trois types de traces visibles.

D'abord des lentilles de glace apparaissent en période froide même si, en général, elles disparaissent en été. Dans le cas commun, leur taille est fine : quelques millimètres voire 1 cm

d'épaisseur et 1 à 2 cm de longueur (Ping *et al.*, 2008). Elles créent alors dans le sol une structure feuilletée caractéristiques (*platy structure*). Les lamelles terreuses intercalaires peuvent mesurer entre 1 et 4 mm d'épaisseur. En général, il y a moins de 30 % de glace dans le sol, ce qui suffit paraît-il à expliquer l'élévation de sa surface. Mais dans certains cas, la proportion de glace peut être supérieure. Alors les lentilles de glace sont centimétriques en épaisseur et décimétriques en longueur (Kokelj *et al.*, 2007). À la limite, des blocs de glace pure sont observés au sein du matériau terreux.

Ensuite, les mouvements au sein de la terre font souvent apparaître des traces de cryoturbation. Concrètement, les horizons du sol ne sont plus horizontaux mais obliques, voire localement verticaux. Les illustrations de ce phénomène abondent (Bockheim et Tarnocai, 1998 ; Van Vliet-Lanoë, 1998 ; Jones *et al.*, 2009).

Enfin, la bosse peut se fendre en haut sous l'effet de la pesanteur si les forces centrifuges sont importantes. Alors la couverture végétale se déchire, de la boue se répand en surface et la bosse cesse de s'élever. C'est la *cryo-expulsion*. Cela se voit aux très hautes latitudes (Holloway *et al.*, 2017). Localement, les sommets de buttes sont crevés par la pression de la terre si bien que cette morphologie constitue une forme de transition avec les *frosts boils* ou ostioles.

Plus on descend en latitude, plus les bosses s'observent à des altitudes élevées. Par exemple, au nord de l'Islande, par 66 degrés de latitude nord, on les trouve sur des terrasses marines (Owczarek *et al.*, 2018). En Colombie britannique (Canada), à 52 degrés de latitude nord, on les observe dans les vallées vers 1300 m d'altitude (Verret *et al.*, 2019). Dans les Alpes françaises, par 46 degrés de latitude, elles se rencontrent dans les alpages à partir de 1800 m. Bien entendu, l'effet de la latitude se combine avec la position par rapports aux grands continents et courants marins mondiaux. On trouve des buttes à 43 degrés de latitude nord mais à quelques mètres d'altitude seulement sur la péninsule Nemuro au nord-est du Japon (Ogata, 2007). On pourrait donc croire à l'unicité du mécanisme de formation qui ferait intervenir le froid seulement.

2.2. Différences entre earth hummocks et buttes gazonnées alpines

Au premier regard, les buttes de nos montagnes tempérées rappellent les hummocks des hautes latitudes. Il y a pourtant de sérieuses différences.

D'abord, elles se forment sans présence du permafrost.

Ensuite, nous n'y avons pas repéré de lentilles de glace pourtant recherchées en toutes saisons. Mais nos observations ont peut-être été insuffisantes. Dans l'état actuel des investigations, on pense que le mécanisme présenté plus haut ne peut pas fonctionner. Prétendre que les buttes se sont formées en climat périglaciaire et ont subsisté ensuite pendant

Photo 3 : Coupe dans une bosse sur les schistes noirs du Versoyen (Crétacé moyen probable) au col du petit-Saint-Bernard. Altitude 2170 m. © B. Mourier

Photo 3: Section through a hump on the black shales of Versoyen (probably Middle Cretaceous) at the Little Saint Bernard Pass, altitude 2,170 m. © B. Mourier



de longs millénaires sans être aplaties par l'érosion hydrique, les animaux fouisseurs, le bétail qui passe, etc., est une affirmation peu vraisemblable qui ne repose sur aucune démonstration.

En troisième lieu, les buttes gazonnées que nous avons observées dans les Alpes ne présentent pas de traces de cryoturbation. Il en est de même pour celles trouvées en Angleterre dans les landes de Dartmoor (Killingbeck et Ballantyne, 2012). Là, le sol est homogène sous les bosses et entre les bosses si on excepte les variations liées au mat racinaire (Photos 3, 4 et 5).

2.3 Hypothèse de formation pour les montagnes tempérées

Sur la base d'un ensemble d'arguments qui seront examinés ci-après, et dont l'accumulation constitue un faisceau convergent de présomptions, nous pensons que le bétail joue un rôle dans la formation de ces bosses. Le mécanisme serait le suivant : à certaines périodes de l'année (printemps et automne) la surface du sol est gelée sur quelques centimètres d'épaisseur, ce qui renforce la cohérence et l'imperméabilité que lui confère par ailleurs un tapis racinaire continu. En dessous, le sol peut être pâteux. Dans ces conditions, le passage du bétail compacte le sol sous les sabots et provoque, en retour, une élévation latérale. À titre d'image, on obtiendrait un effet similaire en marchant sur la bâche recouvrant une piscine en hiver et installée pour éviter qu'une personne tombe et se noie.

Il convient de préciser que cette hypothèse, bien que n'ayant pas toujours été examinée en détail, ni systématiquement appuyée par des éléments de démonstration, a déjà été formulée par plusieurs auteurs.

« Les vaches sont capables de créer une ségrégation végétale et une amorce de surrection minérale par le simple piétinement amplifié a posteriori probablement par le gel » (Dambrine, 1981, p. 81).

« hummocks created by soil compaction from trailing by livestock and wildlife » (Girard et al., 1997).

« Another hypothesis described in the management literature but not explored in the scientific literature is hummock formation facilitated by domestic livestock grazing » (Smith, 2011). « Domestic livestock grazing could have been a factor in hummock formation but was not captured in this study » (même source).

Enfin, in Oliva et al. (2022), on lit : « In Iceland, livestock – especially horse and cattle – accelerates the formation of thúfur (or earth hummocks; Schunke and Zoltai, 1988) due to the frequent grazing in winter, when water saturation of the soil occurs: the animals put the feet in the depressions between the hummocks, and given the low soil cohesion, a gradual upwards push of the hummocks occurs (Arnalds, 2015) ».

En troisième partie, nous développerons les arguments qui confortent cette hypothèse. Ils relèvent des domaines suivants : observations de transformations du sol provoquées sans ambiguïté par le bétail, analyse de lames minces de sol, organisation spatiale des bosses dans les alpages et observations issues du génie civil.

Pour certains auteurs, ces buttes seraient potentiellement liées à la solifluxion (Dambrine, 1981 ; Lewkowicz, 2011). En effet, ramollies en période de dégel, elles ont tendance à fluer (Photo 1), à une vitesse approximative d'un mètre par siècle. Les espaces entre les bosses seraient soumis à des phénomènes de soustraction (niches de décollement), d'érosion ou encore de colluvionnement, selon la position sur la pente. Ce mécanisme ne peut pas s'appliquer en zone plane ; en revanche, sur pente, il pourrait s'ajouter à celui que nous proposons.

D'autres hypothèses sont peu solides. Par exemple certains auteurs attribuent les bosses à la faune (fourmières, taupinières) ou à la flore qui bloquerait localement l'érosion du sol. En revanche faune et flore peuvent exploiter les conditions stationnelles créées par la surrection des bosses (Dorioz et Party, 1987).

Enfin, l'hypothèse des « argiles gonflantes » et du relief de type gilgai, un peu farfelue, doit être écartée. En effet, des analyses poussées du cortège minéralogique des buttes du Petit St Bernard (Photos 4 et 5), réalisées par Lucien Roger à Montpellier montrent que les minéraux présents correspondent à ceux de la roche mère (micas, argiles-micas, feldspath, chlorite). Comme dans de nombreux sols, on trouve des traces d'autres minéraux mais l'absence de quartz est notable. La roche mère, un dépôt de pente, correspond soit à une argilite non recristallisée par métamorphisme (dépôt de l'étage Houiller), soit au résidu de l'altération de calcaires noirs. La seconde hypothèse est plus probable compte tenu

Photos 4 et 5 : Coupe dans des bosses au col du Petit St Bernard, à 2200 m environ, sur calcschistes noirs du Dogger (Jurassique moyen). Le premier cliché est en coupe, le second est une vue de dessus après arasement des bosses.
© B. Mourier

Photos 4 and 5: Cross-section of bumps at the Petit St Bernard Pass, at an altitude of approximately 2,200 m, on black Dogger calcschists (Middle Jurassic). The first photo shows a cross-section, the second is a view from above after the bumps have been leveled. © B. Mourier



de l'organisation des dépôts géologiques et de la position des profils au niveau du col.

3. OBSERVATIONS COMPATIBLES AVEC L'HYPOTHÈSE « RÔLE DU BÉTAIL »

3.1 Piétinement par le bétail

Dans ce paragraphe, nous allons rappeler que certaines déformations du sol, en alpages, sont indiscutablement liées au bétail. Dans ce contexte, les buttes gazonnées ne seraient qu'une forme de plus impliquant l'action des gros animaux.

Photo 6 : Mottureaux en milieu très humide. Parc National de la Vanoise. © JP Legros

Photo 6: Mottureaux in a very humid environment. Vanoise National Park. © by JP Legros



Les *mottureaux* sont de toutes petites bosses à flancs verticaux qui s'observent un peu partout à proximité d'étendues d'eau. Par exemple en bord de mer, dans les prés salés du Médoc, Charente, Vendée, Loire-Atlantique (Verger, 1968). Elles sont aussi qualifiées de *mottes*, *truchines*, *beurlins*, *gabus*, *mottons*, ... Certaines organisations, observées en Vanoise, à l'approche de mares d'altitude sont certainement à ranger dans la même catégorie (*Photo 6*).

Ces mottureaux sont tout simplement liés au piétinement par le bétail qui hache la couverture végétale en milieu saturé d'eau. Là où cette couverture est détruite, le sol écrasé est mis à l'état pâteux voire liquide. Sur pente, même très légère, il est entraîné vers l'aval. Au contraire, là où la couverture végétale est épargnée par les sabots, le chevelu racinaire lie les agrégats terreux et les protège de l'érosion. Par rapport aux bosses des alpages, les mottureaux ont au moins deux caractères distinctifs : ils sont plus petits et leurs flancs, coupés par les sabots, sont dénudés et apparaissent quasi verticaux. Toutefois, ils prouvent que les vaches peuvent créer un microrelief du sol. Le gel n'explique pas tout.

Dans d'autres cas, la circulation des animaux sur des pentes fortes, mais en suivant les courbes de niveau, crée des banquettes (*Photo 7*).

Il faut souligner deux différences essentielles entre ce genre de forme, établie par des animaux, et celle qui résulte d'une descente naturelle des matériaux sur la pente par reptation et solifluxion. Dans le deuxième cas les banquettes sont inclinées presque autant que la pente et forment des festons. Bien sûr, des formes naturelles ont pu être parcourues par le bétail et être ainsi retaillées.

Dans l'exemple suivant, qui concerne aussi des moutons, mais en Islande cette fois, les conditions de milieu, et peut-être la fréquentation plus faible, font que la surface horizontale n'est pas privée de sa végétation (*Photo 8*). Les vaches font le même

Photo 7 : Banquettes engendrées sur une pente par le passage de moutons (Mercantour, Alpes du Sud). © JP Legros.

Photo 7: Benches created on a slope by sheep grazing (Mercantour, Southern Alps). © by JP Legros



Photo 8 : Banquettes légères créées par le pâturage des moutons ; Islande du sud. Altitude 50 m, cascade Skógafoss. © JP Legros

Photo 8: Light benches created by sheep grazing; southern Iceland. Altitude 50 m, Skógafoss waterfall. © JP Legros



type de dégât mais d'une manière plus affirmée, à cause de leur poids plus important (Trimble et Mendel, 1995). Surtout, pour ne pas glisser, elles mettent leurs sabots toujours au même endroit, dans les pas de l'animal précédent. Il en résulte une couverture végétale abîmée de manière très spécifique et comme poinçonnée par un engin à chenilles (*Photos 9 et 10*).

Dans le Chablais, par exemple sur le Mont de Grange, en versant nord-est, on observe la même chose sur des surfaces considérables (*Photo 11*). La montagne est largement striée de chemins de vaches qui provoquent ou non la disparition complète de la végétation. En beaucoup d'endroits, ces chemins apparaissent en pointillés. Cela correspond aux « chenillettes » présentées plus haut.

En résumé, les effets des animaux domestiques dans la transformation des sols sont souvent considérables et parfois spectaculaires (Trimble et Mendel, 1995).

Photo 9 et 10 : En Vanoise, « chenillettes » de vaches en banquettes sur des pentes en milieu schisteux. © JP Legros

Photo 9 and 10: In Vanoise, result of cows grazing on slopes in a schistose environment. © JP Legros



3.2 Observations du tassement en lames minces

Nous avons retrouvé les lames minces fabriquées il y a plus de quarante ans par l'un de nous dans le cadre de son mémoire de DEA (Dambrine, 1981), et les avons réexaminées avec attention. Elles concernent les champs de bosses sur les calcschistes du Beaufortain. Deux exemples typiques sont présentés.

Une différence majeure de structure apparaît entre bosses et inter-bosses. Le sol sous la bosse est très poreux avec une structure rubanée (*banded fabric*), caractérisée par une macroporosité organisée préférentiellement en plans plus ou moins horizontaux et parallèles (*Photo 12*). Ceci pourrait correspondre à la trace d'anciennes lentilles de glace (Van Vliet-Lanoë, 1982), des structures similaires ayant été décrites dans des lames minces de hummocks canadiens (Brewer et Pawluk, 1975 ; Todisco et Bhiry, 2008, fig. 4G). Toutefois, dans

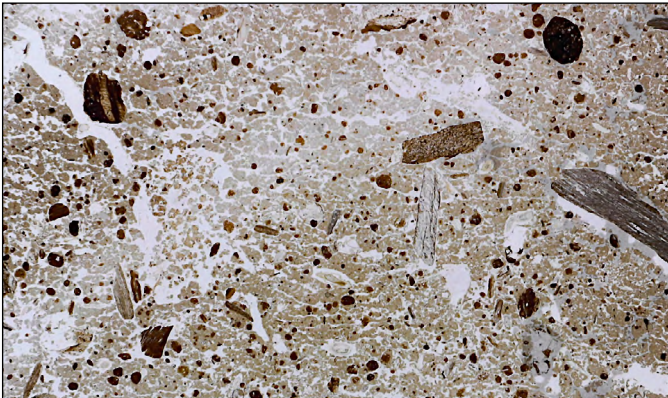
Photo 11 : Cliché IGN du 08/07/2020. Flanc Nord-Est du Mont de Grange. Chablais. Photo du 22/08/2023. Altitude 1940 m environ.

Photo 11: The northeast flank of Mont de Grange (Chablais. IGN Photo from august 22, 2023. Altitude approximately 1,940 metres.



Photo 12 : Organisation de la porosité dans une butte gazonnée du Beaufortain (largeur du cliché 24 mm). © Lame Dambrine

Photo 12: Porosity organization in a grassy mound in Beaufortain (slide width 24 mm). © Dambrine thin section

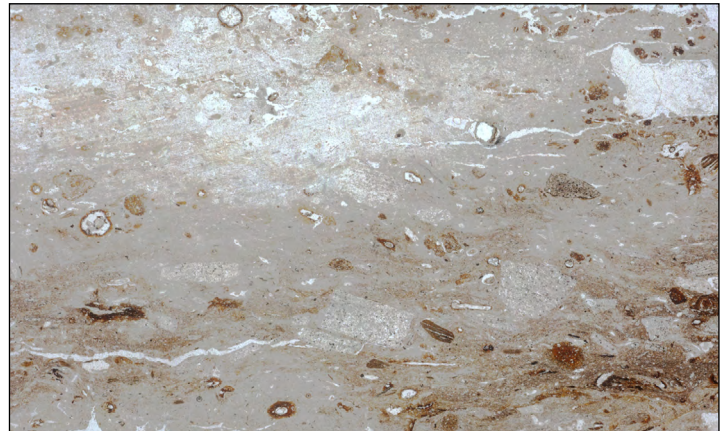


nos observations, certains éléments grossiers (plaquettes de la taille des sables) semblent redressés, comme sous l'effet d'une contrainte latérale. A plus fort grossissement (Dambrine, 1981, page 80), les fissures horizontales sont associées à d'autres, verticales. Toutes proportions gardées, cette organisation évoque un processus analogue à la fracturation hydraulique : un liquide injecté sous pression dans un milieu peu résistant engendre des fissures secondaires perpendiculaires aux premières. Ceci est cohérent avec les hypothèses présentées dans cet article.

Au contraire, les espaces inter-bosses ne présentent pas de macroporosité visible (*Photo 13*). Ils sont massifs, comme compactés. Les zones foncées correspondent à de l'hydromorphie (fer oxydé), tandis que les zones claires correspondent à des secteurs blanchis dépourvus de fer.

Photo 13 : Espace inter-bosses dans le Beaufortain. Macroporosité invisible. Aspect tassé. Taches rouille et zones blanchies apparentes. Largeur du cliché 12 mm. © Lame Dambrine

Photo 13: Inter-lump space in Beaufortain. Invisible macroporosity. Compact appearance. Rust spots and bleached areas are visible. Slide width 12 mm. © Dambrine thin section



3.3 Organisation spatiale des bosses dans les alpages

(1) Dans les Alpes et le Massif Central, les buttes s'observent là où on trouve du bétail. Les plus belles formes sont observées dans les alpages réputés (Beaufortain pour le Beaufort, Puy-de-Sancy pour le Saint-Nectaire, Mont de Grange pour le fromage d'Abondance, etc.). D'ailleurs, lorsque l'on examine des buttes gazonnées sur des images de Google Earth dans les montagnes tempérées, on repère facilement la présence de vaches ou de chevaux, en s'aidant si nécessaire des images antérieures disponibles (*Photos 14 et 15*).

(2) Lorsqu'on prend du recul et que l'on examine les buttes sur les photographies aériennes ou à distance, on constate qu'elles ne sont pas en quinconce ni disposées dans un réseau hexagonal, comme on pourrait s'y attendre si elles résultaient d'une polygonation liée au gel. Au contraire, leur organisation semble résulter d'une multitude de chemins entrecroisés (*Photo 16*). En outre, quand on change de parcelle (en haut et à droite sur le cliché), les bosses cessent brutalement.

Par ailleurs, un cliché (figure 10.17 in Arnalds, 2015) montre, le long d'une clôture, une parcelle couverte de thufurs. Or elle est soumise à un pâturage intensif par des chevaux, tandis que la parcelle adjacente, soumise à un pâturage léger par des ovins, en est dépourvue. Cela suggère fortement que la formation des bosses est liée aux modalités d'exploitation du sol, et pas seulement à ses propriétés intrinsèques.

(3) Les bosses sont plus ou moins circulaires seulement si la pente est nulle ou modérée, là où les vaches peuvent circuler librement dans toutes les directions (*Photo 17*). Quand la pente augmente, les buttes s'allongent parallèlement aux courbes

Photo 14 : Une zone d'alpage au-dessus et à l'ouest du col du Petit-Saint-Bernard à 2400 m. L'image Google-Earth a été traitée (recherche des limites, inversion noirs/blancs) pour mettre en évidence les microreliefs. On voit qu'ils sont particulièrement nets à proximité de la mare, où vient s'abreuver le bétail, et sur les pistes qui y conduisent.

Photo 14: An alpine pasture area above and west of the Petit-Saint-Bernard Pass at 2,400 m. The Google Earth image has been processed (search for boundaries, black/white inversion) to highlight the micro-reliefs. It can be seen that they are particularly clear near the pond, where cattle come to drink, and on the tracks leading to it.

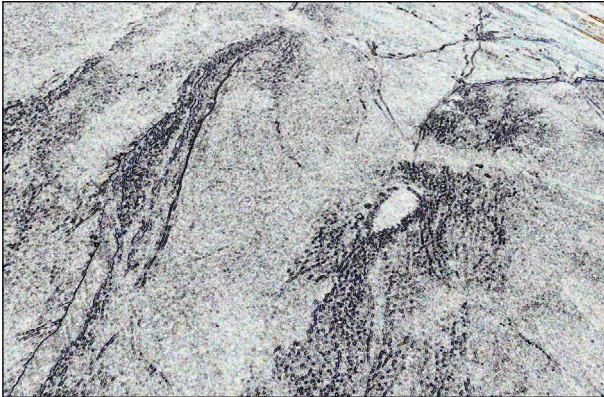


Photo 16 : Champ de bosses en Vanoise ; on y voit de très nombreuses traces de cheminement du bétail, en particulier, au premier plan, dans le sens de la diagonale descendante de la photo. Au deuxième plan, les cheminements sont encore plus nets : horizontaux ou verticaux par rapport au plan de la photo. ! © B. Mourier

Photo 16: Field of bumps in Vanoise; there are numerous traces of livestock paths, particularly in the foreground, running diagonally downwards in the photo. In the background, the paths are even clearer: horizontal or vertical in relation to the plane of the photo. © B. Mourier

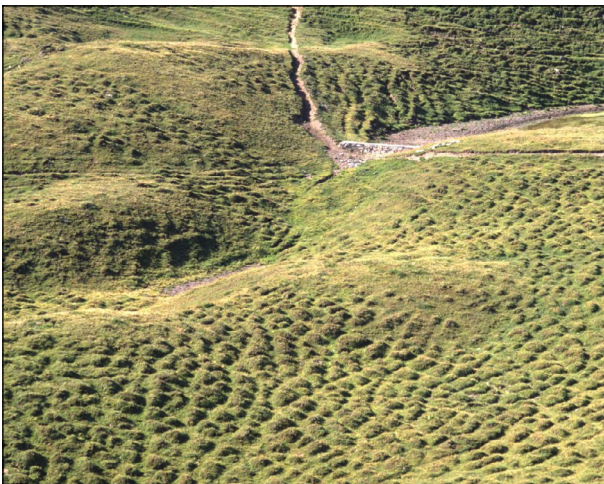


Photo 15 : Troupeau et relief bosselé dans le Chablais sur calcaires marneux. Ici le replat est épargné, peut-être par manque de profondeur du sol. Et les bosses, peu affirmées, paraissent en formation. © JP Legros

Photo 15: Herd and bumpy terrain in the Chablais region on marly limestone. Here, the plateau has been spared, perhaps due to the shallow depth of the soil. And the bumps, which are not very pronounced, appear to be forming. © JP Legros



de niveau. Toutefois, cette préférence pour les pentes faibles a également été mobilisée comme argument en faveur d'une origine héritée.

(4) Dans les zones fréquentées par des moutons, notamment dans les Alpes du sud, on retrouve les mêmes phénomènes : une incision linéaire du sol sur pente et à l'inverse des buttes plutôt arrondies sur les sommets (Photo 18). Mais les formes sont moins marquées au point que rien n'est observable sous Google Earth. Cela semble cohérent avec notre hypothèse qui fait intervenir le poids des animaux.

(5) Aux hautes latitudes, différentes formes périglaciaires sont étirées dans le sens de la pente (sols striés, certains types de polygones...) (Jones et al., 2009, p. 31 ; Hallet, 2013, etc.). On retrouve cela aussi dans les Alpes à très haute altitude. Au contraire, l'étirement des buttes alpines est perpendiculaire à la pente et parallèle donc aux courbes de niveau, ce qui correspond également aux trajectoires de déplacement du bétail (Photos 17 et 18).

(6) Le site du col du Mont Joly (Chablais, Les Contamines-Montjoie) est particulièrement démonstratif. Au nord-ouest du col, sur une bande de terre servant à la circulation du bétail on observe successivement : des pistes avec poinçonnement de la couverture végétale sur pente forte, puis en continuité, des pistes séparées par des buttes plus ou moins allongées sur pente plus douce, enfin en continuité toujours, des bosses sans orientation préférentielle quand la pente s'adoucit à l'approche

Photo 17 : Le cliché montre deux zones : une pente où le sol est strié linéairement par le bétail et un replat sommital, où le sol est découpé en buttes plus ou moins circulaires. Massif Central, Puy de la Croix Morand, 1500 m, © IGN photo du 08/04/2017.

Photo 17: The Photograph shows two areas: a slope where the ground is lined with linear tracks made by livestock, and a flat summit area where the ground is divided into more or less circular mounds. Massif Central, Puy de la Croix Morand, 1,500 m, © IGN Photograph dated April 8, 2017.



Photo 19 : Cheminement et bosses sur le site du col du Mont Joly (45°47'37.8»N 6°39'42.3»E, 2150 m, les Contamines-Montjoie, Savoie) : A. Pistes où la couverture végétale est percée sur pente forte, B. Pistes inscrites entre des buttes plus ou moins allongées, C. Bosses sans orientation préférentielle. Pour mieux voir, grossir l'image au maximum.

Photo 19: Trackways and mounds at the Mont Joly Pass site (45°47'37.8»N, 6°39'42.3»E, 2150 m, les Contamines-Montjoie, Savoie): A. Trails where the vegetation cover is broken on steep slopes, B. Trails between more or less elongated mounds, C. Bumps with no preferred orientation. To see better: enlarge the image as much as possible.

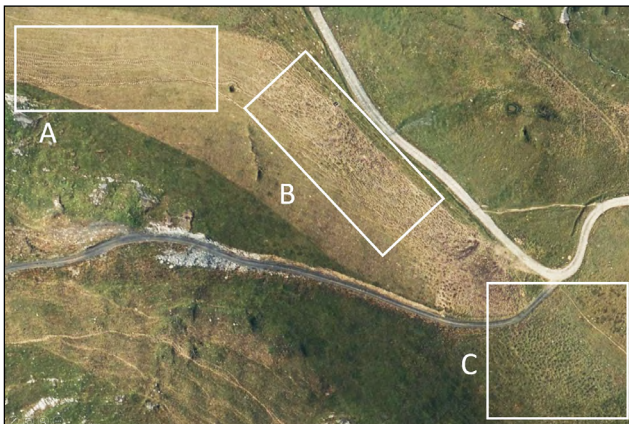


Photo 18 : Traces de cheminement des animaux domestiques à proximité du col du Lautaret. © JP Legros.

Photo 18: Traces of domestic animals near the Lautaret Pass. © JP Legros



du col (Photo 19). Tout cela est cohérent avec un rôle du bétail qui s'exprime différemment suivant la pente.

(7) La consultation de documents techniques relatifs à la conception de stabulations indique que la morphologie des vaches est telle que la distance moyenne entre le museau en train de brouter et les pattes avant est d'environ 80 cm. En d'autres termes si la butte ne dépasse pas 1,60 m de diamètre, une vache peut en consommer toute l'herbe, sans efforts, sans laisser de refus, les pattes installées dans les trous selon l'habitude de cette espèce. Or, les bosses mesurent entre 50 et 150 cm de diamètre (Tableau 1). Donc, leur taille n'est pas incohérente avec l'hypothèse que nous défendons.

4. APPORT DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

4.1 Observations

Rappelons d'abord les travaux menés par les spécialistes des réseaux routiers (Doré, 1997 ; Sylvestre, 2017). Au printemps, des barrières de dégel sont mises en place, en particulier sur les routes du Grand Nord. En effet, en automne, l'eau de pluie s'infiltre à travers le bitume, qui est légèrement poreux ; elle gèle ensuite provoquant un soulèvement de la chaussée de plusieurs centimètres (jusqu'à 8 cm et parfois plus). Lors du dégel printanier, la couche supérieure de bitume est ferme mais une couche sous-jacente plastique voire liquide se forme, prise en sandwich entre le revêtement et le substrat dur. Si un véhicule lourd passe, il engendre des ornières mais également une onde de déformation qui se propage vers l'avant. Autrement dit, la route se déforme à la fois dans le sens transversal et dans le sens longitudinal.

Il y a deux périodes pendant lesquelles le sol des alpages peut présenter des conditions analogues, avec une surface gelée reposant sur un horizon plus meuble. Le premier cas correspond au retour de gelées nocturnes à la fin de l'hiver, quand les beaux jours s'annoncent. Des mesures réalisées dans les montagnes du Colorado montrent que cette situation peut se produire une dizaine de jours par an, entre 2000 et 2500 m d'altitude (Smith, 2011). L'autre période favorable au gel en surface correspond au retour du froid à l'automne (Michel et al., 2012). Or, des températures négatives n'impliquent pas nécessairement que le bétail ait été rentré dans les étables. En effet, la période de « neutralité thermique », à laquelle les bovins s'adaptent facilement, va de -5° à $+20^{\circ}\text{C}$ (source VetAgro Sup) et de -15° à $+10^{\circ}\text{C}$ pour les chevaux islandais ! Par ailleurs, il a été montré expérimentalement qu'une température de -5°C peut geler le sol sur 5 cm en 24 heures (Lai et al., 2012), en fonction de l'humidité, de la texture et de la température antérieure. Gelée, la surface du sol reste souple à cause du mat racinaire. D'où l'hypothèse déjà présentée : une vache qui circule sur ce milieu, dur en surface et mou en profondeur, est susceptible de provoquer une déformation de cette surface.

Enfin, bien que la déformation correspondante du sol ne soit pas permanente, on peut en provoquer une dans un sol saturé d'eau, dès lors qu'il est surmonté d'une couche suffisamment résistante pour supporter deux observateurs. C'est même une expérience classique : le premier opérateur saute à pieds joints, le plus lourdement possible, tandis que le second, placé à 10 mètres, sent le sol trembler sous ses pieds. Cette méthode permet notamment de détecter la présence d'une tourbière sans recours à une tarière. En d'autres termes, un sol saturé d'eau transmet latéralement les contraintes, même à longue distance.

Donc l'abaissement du sol en un point donné peut provoquer un rehaussement dans le voisinage.

L'hypothèse de la déformation plastique du sol, pris entre deux couches plus rigides, a déjà été émise dans un contexte de cryoturbation : « *We believe that this happens when winter freezing occurs in soils with certain moisture contents, due to the strong and uneven pressure of the growing ice on a wet and plastic soil mass compressed between the frozen soil surface and hard primary Maastrichtian chalk in the bottom* » (Kovda et al., 2019).

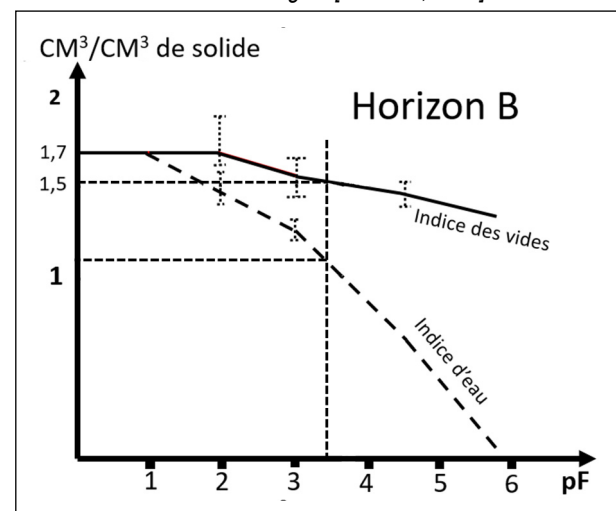
4.2 Abaissement de l'inter-bosse par tassement

L'observation des lames minces montre que la macroporosité disparaît dans l'inter-bosse. Il serait nécessaire de quantifier précisément ce phénomène à l'aide d'un dispositif adapté et de réaliser de nombreuses répétitions. En l'absence de telles mesures, on peut estimer cet effet de l'ordre de 20 % en hauteur, soit près de 8 cm si on considère que le tassement affecte une épaisseur de sol de 40 cm.

Le tassement concomitant de la microporosité est plus difficile à évaluer. La taille des pores fonctionnels qui servent au stockage temporaire de l'eau, ont un diamètre modal de l'ordre de $3\ \mu\text{m}$. Ils ne sont donc pas visibles sur les lames minces présentées ci-dessus. Il nous faut donc examiner si le poids des vaches est suffisant pour jouer sur eux. D'après la littérature, les vaches exercent au sol une pression de 5 à 7 kg par cm^2 , disons 6 pour simplifier. En théorie c'est moins si on divise leur poids par la surface de leurs quatre sabots. Mais il faut tenir compte des mouvements de l'animal. À ce sujet, la technique de mesure consiste à examiner l'enfoncement du sabot dans un sol meuble puis à le reproduire à proximité, pour la même profondeur, avec un pénétromètre (Duret et Morlon, 1985) Or, 6 kg de pression correspondent précisément à une colonne d'eau de 6000 cm et donc à une force potentielle (pF) valant $\log(6000) = 3,37$ au signe près. Ensuite, même si la pression exercée par les vaches est suffisante et que la vidange de l'eau est complète, le tassement s'arrête lorsque les particules solides entrent en contact les unes avec les autres. Parallèlement, l'air occupe les vides laissés par l'eau. Ces phénomènes renvoient aux notions d'indice d'air et d'indice d'eau. Pour approfondir ce point, référons-nous à une thèse consacrée au fonctionnement hydrique les sols limoneux des alpages du Beaufortain (van Oort, 1984). L'auteur a étudié la perte d'eau d'échantillons en fonction de la contrainte exercée (Figure 2), c'est-à-dire entre pF1 et pF6. On expose ici les résultats obtenus pour un horizon B, représentatif d'une dizaine d'échantillons analysés. L'incertitude associée aux mesures est représentée et apparaît relativement faible. Des droites en pointillés ont été ajoutées par nos soins pour les besoins de l'exposé.

Figure 2 : Lien entre pF, indice d'eau et indice des vides pour les sols du Beaufortain [van Oort, 1984]

Figure 2: Relationship between pF, water index, and void index for soils in the Beaufortain region [van Oort, 1984]



Au cours de la dessiccation, la quantité d'eau décroît quand le pF augmente. Sur les courbes, un ressuyage du sol jusqu'à pF 3,37 fait passer l'indice des vides de 1,7 à 1,5 en cm^3/cm^3 . En supposant que la réduction de volume s'effectue verticalement, la hauteur du sol est réduite de $(1,7-1,5)/(1+1,5) = 8\%$. Dans cette opération « 1 » correspond au volume de solide. Pour les horizons C, un calcul similaire donne 10 %. Prenons donc 9 % en moyenne.

Au total, pour une épaisseur de sol de 40 cm, la réduction de hauteur peut être estimée à $40 \times 0,20$ (macroporosité) + $40 \times 0,09$ (microporosité), soit 12 cm seulement. Ainsi, l'expulsion de l'eau de la porosité sous l'effet du poids du bétail permettrait d'expliquer de l'ordre d'un tiers du différentiel d'altitude observé entre les creux et les bosses.

4.3 Transfert de matière entre inter-bosse et bosse

Si le tassement différentiel représente un tiers du relief des zones de buttes gazonnées et si leur apparition demande 20 ans comme indiqué par les agriculteurs, alors il faut que la bosse s'enrichisse chaque année de $2/3 \times 1/20 = 3\%$ de sa masse de terre. Dans un contexte où microfaune du sol et racines apportent des perturbations, il ne serait pas étonnant que cela demeure imperceptible.

Par ailleurs, on peut calculer le poids des bosses en leur attribuant une forme géométrique simplifiée (coupole, cylindre vertical, etc.). Nous avons réalisé ce type de calcul, qui conduit à des masses de l'ordre de quelques centaines de kilogrammes. Les vaches exercent donc une pression suffisante pour provoquer la remontée de la terre saturée en eau sur 30 à 35 cm dans l'environnement immédiat de leurs sabots, par simple transfert de pression.

Photo 20 : Bloc laboureur, parc National des Pyrénées, © Wikipédia, auteur anonyme

Photo 20: Plow block, Pyrenees National Park



Enfin, revenons au terrain pour une dernière observation. Les « Blocs laboueurs », en se déplaçant vers l'aval sur des sols temporairement saturés d'eau, créent autour d'eux (à l'avant et sur les côtés) des bourrelets parfois importants (*Photo 20*). Leur déplacement est généralement attribué à la formation de lentilles de glace (Ballantyne, 2001), mais aussi à la déformation d'un sol pâteux soumis à une contrainte. Donc il est prouvé qu'une charge appliquée au sol peut entraîner une remontée latérale du matériau en compensation du creusement imposé. Par ailleurs, la tranchée ainsi formée disparaît plus ou moins rapidement derrière le bloc (*Photo 21*), ce qui atteste d'un réajustement naturel du sol. Ce processus de remise à plat a déjà été évoqué plus haut.

CONCLUSION

En résumé, notre hypothèse de la responsabilité du bétail, dans la fabrication des bosses alpines, repose sur un ensemble convergent d'indices. D'abord ces formes apparaissent en l'absence de permafrost et parfois en l'absence de conditions périglaciaires (Angleterre). Ensuite, dans les nombreuses observations que nous avons réalisées, elles ne présentent ni structures de cryoturbation, ni lentilles de glace visibles. Après avoir rappelé que le bétail modifie très fréquemment la couverture pédologique en montagne, nous avons montré que la géographie des bosses (forme, taille, position dans l'espace) peut s'expliquer par le passage répété des animaux et semble en relation avec leur poids. Le tassement des zones inter-bosses a par ailleurs été confirmé. Plusieurs observations relatives à la physique des matériaux montrent la cohérence de notre hypothèse avec les déformations possibles d'une couche molle prise entre deux couches rigides. Le mécanisme proposé est également cohérent avec les observations d'agriculteurs, qui

Photo 21 : Bloc laboureur, Alpage de Bise Haute Savoie. © JP Legros

Photo 21: Plow block, Bise Alpine pasture, Haute Savoie. © JP Legros



rapportent la formation ou la régénération de ces bosses sur des pas de temps de l'ordre de vingt ans.

Il est toutefois probable que dans certains contextes, notamment aux latitudes intermédiaires comme en Islande, des bosses cryogéniques voient leur taille exacerbée par le passage du bétail ou des chevaux. Les deux mécanismes de cryoturbation et de piétinement ne sont pas antagonistes. En outre, la colonisation fréquente des buttes par le nard raide et par des sous-arbrisseaux dont les éricacées, renforce probablement l'exploitation des espaces inter-buttes par le bétail et donc leur tassement. Notre propos était d'insister sur le rôle du bétail mais le phénomène étudié est multifactoriel, ce qui explique la diversité des interprétations proposées dans la littérature.

Quoiqu'il en soit, l'observation de ces buttes dans les Alpes, le Massif Central ou d'autres massifs tempérés suppose la conjonction de plusieurs conditions, en plus du bétail : des sols limoneux, des milieux humides bien arrosés, une couverture végétale continue (mat racinaire), une pente modérée, et conditions climatiques favorisant des alternances fréquentes de gel et de dégel (température moyenne annuelle proche de 0 °C).

En France, ces conditions sont réunies sur de nombreux cols en contextes schisteux ou volcaniques, ou l'on trouve des sols épais, une altitude suffisante, de l'herbe dense, une humidité forte liée au drainage des versants, et la présence de chalets d'alpage. Ces sites sont particulièrement accessibles à l'homme et à son bétail.

Par rapport aux hummocks des hautes latitudes, on observe donc une convergence morphologique sans nécessairement une identité de mécanisme. On a peut-être trop raisonné par analogie.

Des investigations complémentaires apparaissent nécessaires. D'abord il faudrait creuser des fosses pédologiques plus profondes sous les bosses et sous les inter-bosses pour examiner d'éventuels déplacements de terre en profondeur. Il faudrait aussi mesurer les températures au sein des bosses et aussi dans leur horizon superficiel, ceci aux périodes critiques correspondant à la montée en alpage et à la descente d'automne. Des essais concernant les limites d'Atterberg pourraient compléter cette approche. Des calculs précis des pressions exercées par le bétail et leur transmission latérale seraient utiles. Une étude précise avec LIDAR et analyse mathématique, permettrait d'examiner si l'organisation spatiale des bosses s'inscrit dans un système quadrillé (cf. les cheminements du bétail) plutôt qu'hexagonal (cf. la polygonation liée à des phénomènes morphologiques naturels). Enfin, des expérimentations de mise en défens de quelques arpents de terre pourraient permettre d'évaluer la capacité de relaxation du sol en l'absence de pâturage. Ainsi, même si notre hypothèse sur la « responsabilité des vaches » devrait être infirmée, elle ouvre des perspectives de recherches fécondes. L'un de nous envisage d'ailleurs de poursuivre ces travaux avec ses étudiants.

Plus largement, l'ensemble de ces observations conduit à

souligner l'impact généralisé du bétail sur les sols de montagne : il est rare de trouver des surfaces d'alpages réellement intactes, tant le piétinement est fréquent (jusqu'à dix passages annuels selon certains auteurs) : « *Undisturbed stands are rare due to trampling by livestock that use areas for resting and bedding* » (Jankovsky-Jones, 1999). Le bétail façonne, ou a façonné, de manière extensive les sols de montagne. Mais Il convient de rappeler que le nombre d'animaux montés en alpage, en particulier dans les Alpes du Nord, est en forte diminution depuis la seconde moitié du 19^e siècle (Party, 1995).

BIBLIOGRAPHIE

- Arnalds Ó. (2015). The soils of Iceland, 183-pp. Dordt, The Netherlands: Springer Netherlands.
- Ballantyne C.K. (2001). Measurement and theory of ploughing boulder movement, Permafrost and periglacial processes, 12 (3), pp. 267-288. <https://doi.org/10.1002/ppp.389>
- Bockheim J.G., Tarnocai C. (1998). Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. Geoderma, 81, 281-293. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00115-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00115-8)
- Brewer P., Pawluk S. (1975). Investigations of Some Soils Developed in Hummocks of the Canadian Sub-Arctic And Southerne-Arctic Regions, 1. Morphology And Micromorphology, Canadian Journal of Soil Science 55(3), 301-319. <https://doi.org/10.4141/cjss75-039>
- Carbiener R. (1966). Relations entre cryoturbation, solifluxion et groupements végétaux dans les Hautes-Vosges (France). Oeco. Planta, 1, 335-368.
- Choler P. (2018). Winter soil temperature dependence of alpine plant distribution: Implications for anticipating vegetation changes under a warming climate. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 30, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.11.002>
- Collectif (2019). Document d'Objectifs du site Natura 2000 FR8201736 « Marais à Laïche bicolore, prairies de fauche et habitats rocheux du Vallon du Ferrand et du Plateau d'Emparis » - Tome 1 « Diagnostic, enjeux, objectifs de conservation », 118p + Annexe. https://reporterre.net/IMG/pdf/docob_fr2801736_20200103_tome1.pdf
- Costin A.B., Wimbush D.J. (1973). Frost Cracks and Earth Hummocks at Kosciusko, Snowy Mountains, Australia, Arctic and Alpine Research, 5:2, pp. 111-120 <https://doi.org/10.1080/00040851.1973.12003685>
- Dambrine E. (1981). Répartition des phénomènes pédologiques sur le plateau des Saisies. DEA, Paris, 90 p.
- Doré G. (1997). Détérioration des chaussées en condition de gel, une nouvelle approche prévisionnelle. Thèse, Université de Laval, département de Génie Civil, 390 p.
- Doriot J.M., Party J.P. (1987). Dynamique écologique et typologie de territoires pastoraux des Alpes du Nord. 1. Analyse de l'organisation d'un alpage de référence. Acta Oecol. Oecol Appl., 8(3), 257-280.
- Duret J.L., Morlon P. (1985). Approche pénétrométrique de la portance au pâturage. Actes du séminaire « Conditions et effets des excès d'eau en agriculture », INRA, Commission d'Agrométéorologie : 415-422.
- ECG (2009). Ecosystem Classification Group. Taiga Plains, Department of Environment and Natural Ressources, Government of the Northwest Territories, 184 p.

- Girard M.M., Wheeler D.L., Mills S.B. (1997). Classification of Riparian Communities on the Bighorn National Forest. Rocky Mountains Region, USDA Forest Service, 308 p. + annexes.
- Grab S. (2005). Aspects of the geomorphology, genesis and environmental significance of earth hummocks (thúfur, pounus): miniature cryogenic mounds *Progress in Physical Geography* 29, 2, pp. 139–155
- Hallet B. (2013). Stone circles: form and soil kinematics. *Phil Trans R Soc A* 371: 20120357, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0357>
- Harris S.A. (2018). Cryogenic earth hummocks developed in mineral substrats. Conference paper, EUCOP Chamonix-Mont-Blanc, pp. 847-848.
- Harris S.A. (2022). Cryogenic earth hummocks. Présentation PowerPoint, University of Calgary.
- Haugland J.E. (2004). Formation of patterned ground and fine-scale soil development within two late Holocene glacial chronosequences: Jotunheimen, Norway, *Geomorphology* 61, pp. 287–301. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.01.004>
- Holloway J.E., Rudy A.C.A., Lamoureux S.F., Treitz P.M. (2017). Determining the terrain characteristics related to the surface expression of subsurface water pressurization in permafrost landscapes using susceptibility modelling, *The Cryosphere*, 11, pp. 1403–1415 <https://doi.org/10.5194/tc-11-1403-2017>
- Jabłońska E. (2022). Ice Lenses Beneath Hummocks in a Temperate Rich Fen, *Wetlands*, 42:68, 6 p. <https://doi.org/10.1007/s13157-022-01586-y>
- Jankovsky-Jones M. (1999). Conservation strategy for wetlands in east-central Idaho. Report. Idaho Department of Fish and Game, 273 p.
- Jones A., Stolbovoy V., Tarnocai C., Broll G., Spaargaren O., Montanarella L. (eds.), (2009). *Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region*. European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 142 pp. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-atlas-northern-circumpolar-region>
- Keller-Pirkbauer A., Gärtner-Roer I, Bodin X., Paro L. (2022). European Alps (pp. 147-224), In: *Periglacial Landscapes of Europe*, Springer, 523 p.
- Killingbeck J., Ballantyne C.K. (2012). earth Hummocks in West Dartmoor, SW England: Characteristics, Age and Origin. *Permafrost and Periglac. Process*, John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/ppp.1739>
- Kokelj S.V., Burn C.R., Tarnocai C. (2007). The Structure and Dynamics of Earth Hummocks in the Subarctic Forest Near Inuvik, Northwest Territories, Canada, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39:1, pp. 99-109. <http://www.jstor.org/stable/4139120>
- Kovda I., Ryabukha A., Polyakov D. (2019). Cryogenic processes in soils of chalky landscapes in steppe zone south of the Orenburg region, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 368 (2019) 012026. [10.1088/1755-1315/368/1/012026](https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012026)
- Lai Y., Zhang S., Yu W. (2012). A new structure to control frost boiling and frost heave of embankments in cold regions, *Cold Regions Science and Technology* 79-80, pp. 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.04.002>
- Lewkowicz A.G. (2011). Slope hummock development, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *Quaternary Research* 75, pp. 334–346. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.12.013>
- Loranger B., Kuznetsova E., Hoff I., Aksnes J., Skoglund K.A. (2017). Evaluation of Norwegian gradation based regulation for frost susceptibility of crushed rock aggregates in roads and railways. In: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields – Loizos et al. (Eds)*, Taylor & Francis Group
- MAA (2006). (Ministry of Agriculture and Land), Winter considerations: Ice Formation, Freezing Index, and Frost Penetration. https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/agricultural-land-and-environment/water/livestock-watering/590307-1_winter_considerations.pdf
- Mackay J.R. (1980). The origin of hummocks, western Arctic coast, Canada, *Canadian Journal of Earth Sciences* 17(8), pp. 996-1006. <https://doi.org/10.1139/e80-100>
- Michel R.F.M., Schaefer C.E.G.R., Poelking E.L., Simas F.N.B. (2012). Active layer temperature in two Cryosols from King George Island, Maritime Antarctica, *Geomorphology* 155-156, pp. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.013>
- Milošević M.V., Kovačević-Majkić J., Calic J., Milivojević M. (2015). Sub-alpine periglacial morphology of thufur on the southern rim of Vlasina Lake, Serbia, *Erdkunde* Vol. 69 No. 1, pp. 33–47. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2015.01.03>
- Milošević M.V., Čalić J., Kovačević-Majkić J., Milivojević M., (2022). Thufur morphology within the Ponor depression (Stara Planina, Serbia), *J. Geogr. Inst. Cvijic*. 2022, 72(2), pp. 117–132. <https://doi.org/10.2298/IJGI2202117M>
- Ogata T. (2007). Morphology and Environmental Factors of Periglacial Hummocks in the Nemuro Peninsula, Northern Japan, *Geographical Review of Japan*, vol. 80, n° 5, pp. 246-258. <https://doi.org/10.4157/grj.80.246>
- Oliva M., Nyvlt D., Fernandez-Fernandez J.M. (2022). *Periglacial Landscapes of Europe*. Springer, 521 p.
- Owczarek P., Opała-Owczarek W.M., Migala K, Porláksdóttir J.S. (2018). The role of modern aeolian processes in thufur degradation and forming low-scale surface features in northern Iceland – a dendrogeomorphology approach, XXXVII Sympozjum Polarne - Polar Change – Global Change”, 7-10 czerwca 2018, Poznań
- Party J.P. (1995). Les alpages des réserves naturelles de Haute-Savoie. Typologie et zonage des unités écologiques et pastorales. Détermination d'indicateurs de valeur patrimoniale. Comité Scientifique des Réserves naturelle de Haute-Savoie, APEGE, Sol-Conseil - 60 p
- Peterson R.A., Walker D.A., Romanovsky V.E., Knudson J.A., Reynolds M.K., Krantz W.B. (2003). A differential frost heave model: cryoturbation-vegetation interactions. In: *Permafrost*, Phillips, Springman & Arenson (eds), pp. 885-890.
- Peterson R.A., Krantz B. (2007). Differential frost heave model for patterned ground formation: Corroboration with observations along a North American arctic transect, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113. <https://doi.org/10.1029/2007JG000559>
- Ping C.L., Michaelson G.J., Kimble J.M., Romanovsky V.E., Shur Y.L., Swanson D.K., Walker D.A. (2008). Cryogenesis and soil formation along a bioclimate gradient in Arctic North America, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, G03S12, 14 p. doi:10.1029/2008JG000744
- Raynolds M.K., Walker D.A., Munger C.A., Vonlanthen C.M., Kade A.N. (2008). A map analysis of patterned-ground along a North American Arctic Transect, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, 18 p. <https://doi.org/10.1029/2007JG000512>
- Ryabukha A.G., Polyakov D.G., Yakoviev I.G. (2021). Relict cryogenic structures in the landscapes of Orenburg region, Russia. Ninth International Symposium « Steppes of Northern Eurasia », *IOP Conf. Series: Earth Environmental Science* 817, 13 p.
- Sawyer C.F. (2012). Washburn AL (1956) Classification of patterned ground and review of suggested origins. *Geological Society of America Bulletin* 67(7): 823–865. <https://doi.org/10.1177/030913331243890>
- Schunke E, Zoltai S.C. (1988). Earth hummocks. In *Advances in Periglacial Geomorphology*, Clark MJ (ed). Wiley: Chichester; 231–245.
- Scotter G.W., Zoltai S.C. (1982). Earth Hummocks in the Sunshine Area of the Rocky Mountains, Alberta and British Columbia, *Arctic*, vol. 35, n° 3, pp. 411-416
- Soutadé G. (1980). *Modèle et dynamique actuelle des versants supra-forestiers des Pyrénées Orientales*. Thèse d'État, Université de Bordeaux III, 452 p.
- Smith M. (2011). Characteristics of Hummocks and hummocked wetlands in Colorado. Thesis. Colorado State University, 116 p.
- Sylvestre O. (2017). Influence du soulèvement au gel sur la durée de vie utile des chaussées. Mémoire de maîtrise en génie civil, Université de Laval, Québec, 196 pages.

- Todisco D., Bhiry N. (2008). Micromorphology of periglacial sediments from the Tayara site, Qikirtaq Island, Nunavik (Canada), *Catena* 76 (2008) 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.08.002>
- Thompson P.I.J., Dugmore A.J., Newton A.J., Streeter R.T., Cutler N.A. (2022). Variations in tephra stratigraphy created by small-scale surface features in sub-polar landscapes. *Boreas*, Vol. 51, pp. 317–331. <https://doi.org/10.1111/bor.12557>
- Trimble S.W., Mendel A.C. (1995). The cow as a geomorphic agent—a critical review. *Geomorphology*, 13(1-4), 233-253. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00028-4](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00028-4)
- Van Oort F. (1984). Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogenèse. Thèse, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 255 p.
- Van Vliet-Lanoë B. (1982). Structures et microstructures associées à la formation de glace de ségrégation : leurs conséquences. Fourth Canadian Permafrost Conference, 116-122.
- Van Vliet-Lanoë B., Seppälä M. (2002). Stratigraphy, age and formation of peaty earth hummocks (pounus), Finnish Lapland, *The Holocene* 12,2, pp. 187–199. [10.1191/0959683602hl534rp](https://doi.org/10.1191/0959683602hl534rp)
- Van Vliet-Lanoë B., Bourgeois O., Dauteuil O. (1998). Thufur Formation in Northern Iceland and its Relation to Holocene Climate Change. *Permafrost and Periglacial Processes*. 9, 347-365. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1530(199810/12)9:43.O.CO;2-4
- Verger F. (1968). Marais et wadden du littoral français. Biscaye Frères, Bordeaux, 539 p.
- Verret M., Wang Y., Bjornson J., Lacelle D. (2019). Hummocks in alpine tundra, northern British Columbia, Canada: distribution, morphology and organic carbon composition, *Arctic Science* 5, pp. 127–147. <https://doi.org/10.1139/as-2018-0021>
- Villaret J.C., Van Es J., Sanz T., Pache G., Legland T., Mikolajczak A., Lambey B. (2019). Guide des habitats naturels et semi-naturels des Alpes : du Jura méridional à la Haute Provence et des bords du Rhône au Mont-Blanc : description, écologie, espèces diagnostiques, conservation. Naturalia Publications.
- Walker D.A, Epstein H.E., Romanovsky V.E., Ping C.L., Michaelson G.J., Daanen R.P., Shur Y., Peterson R.A., Krantz W.B., Reynolds M.K., Gould W.A., Gonzalez G., Nicolsky D.J., Vonlanthen C.M., Kade A.N., Kuss P., Kelley A.M., Munger C.A., Tarnocai C.T., Matveyeva N.V., Daniëls F.J.A. (2008). Arctic patterned-ground ecosystems : a synthesis of fields studies and models along a North American Arctic Transect. *Journal of geophysical research*, vol 113, 17 p. <https://doi.org/10.1029/2007JG000504>
- Washburn A.L. (1956). Classification of patterned ground and review of suggested origins. *Bulletin of the Geological Society of America*, vol 67, pp. 823-886. <https://doi.org/10.1177/0309133312438909>