



HAL
open science

L'évaluation géoécologique de l'intérêt patrimonial des sols polygonaux hérités en montagne alpine. L'exemple du Col du Noyer (Massif du Dévoluy, Hautes Alpes, France)

Pierre Pech, Mahé Ajinca, Sylvain Abdulkhak, Eric Hustache, Laurent Simon, Brigitte Talon

► To cite this version:

Pierre Pech, Mahé Ajinca, Sylvain Abdulkhak, Eric Hustache, Laurent Simon, et al.. L'évaluation géoécologique de l'intérêt patrimonial des sols polygonaux hérités en montagne alpine. L'exemple du Col du Noyer (Massif du Dévoluy, Hautes Alpes, France). *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 2021, 109 (109-4), 10.4000/rga.8724 . hal-03975967

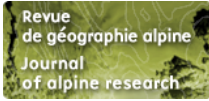
HAL Id: hal-03975967

<https://paris1.hal.science/hal-03975967>

Submitted on 6 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



L'évaluation géoécologique de l'intérêt patrimonial des sols polygonaux hérités en montagne alpine. L'exemple du Col du Noyer (Massif du Dévoluy, Hautes Alpes, France)

**Pierre Pech, Mahé Ajinca, Sylvain Abdulhak, Eric Hustache, Laurent Simon
et Brigitte Talon**



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/8724>

ISSN : 1760-7426

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Référence électronique

Pierre Pech, Mahé Ajinca, Sylvain Abdulhak, Eric Hustache, Laurent Simon et Brigitte Talon,
« L'évaluation géoécologique de l'intérêt patrimonial des sols polygonaux hérités en montagne alpine.
L'exemple du Col du Noyer (Massif du Dévoluy, Hautes Alpes, France) », *Journal of Alpine Research |
Revue de géographie alpine* [En ligne], Varia, mis en ligne le 18 juin 2021, consulté le 18 juin 2021. URL :
<http://journals.openedition.org/rga/8724>

Ce document a été généré automatiquement le 18 juin 2021.



La *Revue de Géographie Alpine* est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons
Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

L'évaluation géoécologique de l'intérêt patrimonial des sols polygonaux hérités en montagne alpine. L'exemple du Col du Noyer (Massif du Dévoluy, Hautes Alpes, France)

Pierre Pech, Mahé Ajinca, Sylvain Abdulhak, Eric Hustache, Laurent Simon et Brigitte Talon

Remerciements

Les auteurs remercient Marie Chenet qui a supervisé les analyses granulométriques au Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591, ainsi que Brigitte Van Vliet-Lanoë et un second relecteur anonyme pour leurs précieux conseils mais aussi Constance Schéré, King's College of London, qui a corrigé la version anglaise de l'article.

Introduction

- 1 En montagne et notamment dans les Alpes, au même titre que dans d'autres régions, la patrimonialisation de la nature repose sur la qualification des enjeux de la gestion conservatoire (Reynard *et al.*, 2011 ; Senzaki *et al.*, 2017 ; Garcia-Lamas *et al.*, 2018). Pour la biodiversité, celle-ci repose sur la prise en considération à la fois des taxons à protéger, faune flore, et des habitats renfermant ces taxons (Mathevet et Godet, 2015 ; Johnson *et al.*, 2017). Les nécessités d'une réglementation, intervenant dans les opérations d'aménagement, ont imposé d'aborder les espèces et leurs habitats. C'est non seulement la base de nombreuses conventions internationales, comme celle de Ramsar, mais aussi de toute la stratégie européenne de conservation de la nature, avec les directives qui ont donné naissance au droit national de tous les États européens et à

la définition des conditions de la protection des espèces et des habitats sur les sites du réseau européen Natura 2000 (Biondi *et al.*, 2012). Entre autres, la mise en œuvre de mesures de gestion de milieux naturels ou d'études d'impacts préalables à toute intervention temporaire (un évènement sportif par exemple) ou durables (l'aménagement d'une infrastructure ou d'un bâti) repose sur des inventaires et souvent des suivis faune-flore dans les secteurs concernés. L'inventaire systématique permet ainsi de consacrer l'importance de la prise en compte d'espèces répertoriées dans les listes réglementaires, comme les espèces classées sur les listes rouges : ce sont des espèces remarquables ou espèces rares et donc à protéger. Cependant la biodiversité ordinaire est aussi prise en compte. En particulier, la richesse et la diversité taxonomiques d'un habitat constitue un aspect de la biodiversité de même que la rareté d'une espèce en fonction de l'espace considéré : par exemple la Dryade à huit pétales (*Dryas octopetala* L.), plante abondante en milieu de toundra polaire ou en très haute montagne, représente un enjeu de conservation si elle est présente à basse altitude en tant que témoignage d'un habitat relique, comme c'est le cas sur certains éboulis froids (Debay et Huc, 2015). Dans ce cas, on combine l'intérêt de patrimonialiser les écosystèmes et les supports géomorphologiques.

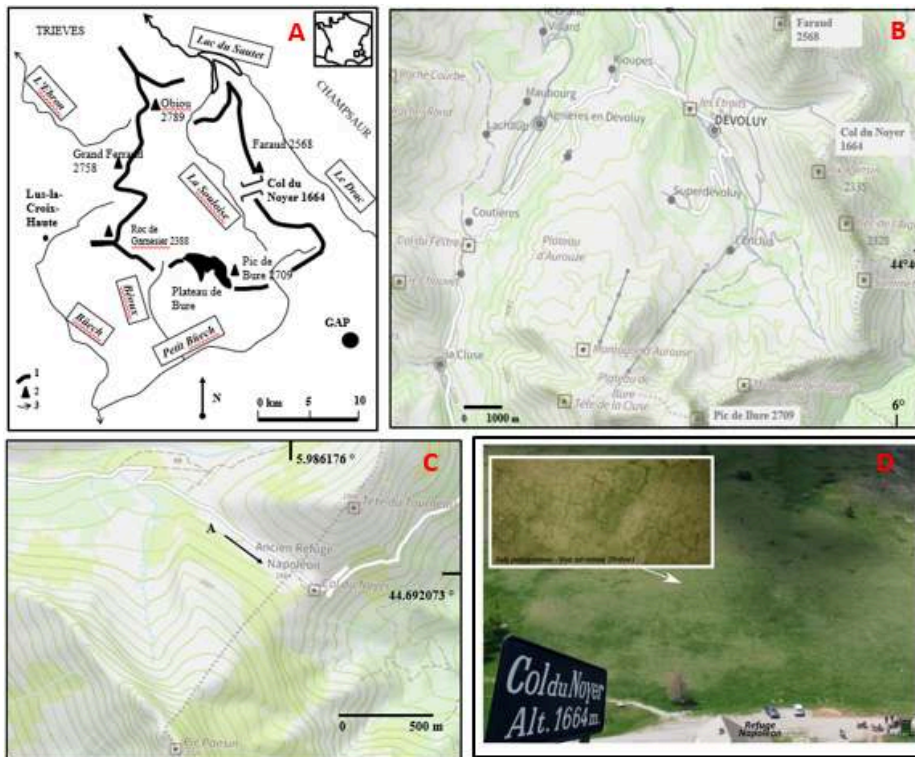
- 2 La montagne et plus particulièrement les Alpes constituent un milieu intéressant pour prendre en compte des sites d'intérêt géologique et géomorphologique (Feuillet, 2010 ; Feuillet et Sourp, 2011 ; Reynard *et al.*, 2011). Cela concerne la richesse en minéraux, en fossiles, en déformations des roches, en paysages occasionnés par des formes structurales. Le domaine alpin renferme aussi des témoins liés à l'action des processus hérités des périodes glaciaires, cirques, verrous glaciaires, vallums morainiques etc. Certains sites sont signalés et valorisés par une signalétique appropriée et certains sont protégés en raison de leur valeur patrimoniale, comme dans la Réserve naturelle nationale géologique de Haute Provence. Cependant, il s'agit aussi de protéger et de surveiller des formes actives qui témoignent de l'évolution des conditions environnementales. C'est le cas de nombreux glaciers alpins (Zekollari *et al.*, 2019). Le programme ROCVEG, piloté par le Conservatoire botanique national alpin (CBNA), sur l'adaptation des habitats rocheux périglaciaires alpins dans un contexte de changement climatique, se focalise sur trois types d'habitats : les éboulis froids, les glaciers rocheux et les marges proglaciaires des glaciers en cours de retrait dans les Alpes. Ce sont des milieux révélateurs, par leur évolution, des sentinelles des changements environnementaux en cours (Reed *et al.*, 2016). Bodin *et al.* (2015) estiment que le pergélisol de montagne représente entre 700 à 1500 km², « soit 10 à 20 % des terrains situés au-dessus de 2000 m d'altitude » dans les Alpes (Bodin *et al.*, 2015). Sa dégradation a des conséquences importantes sur la stabilité des versants progressivement affectés par la fusion de ce pergélisol qui constitue un marqueur de l'évolution du climat.
- 3 Paradoxalement, les sols polygonaux, formes périglaciaires spectaculaires, ne sont pas pris en compte comme des marqueurs de l'évolution du climat. En effet, on recense des sols polygonaux actifs à plus de 2500 m d'altitude, au moins dans plusieurs sites des Hautes-Alpes, par exemple au Plateau de Bure, dans le Dévoluy, à la crête de la Mortice, à l'est de Vars ou au pied de la Tête de Vautisse au sud des Ecrins mais d'autres polygones avaient été répertoriés dans d'autres secteurs des Alpes (CNRS Caen, 1980). En outre, D'Amico *et al.* (2019) estiment que pour les Alpes, les traces d'activité du pergélisol et en particulier des sols polygonaux datant du Pléistocène, c'est-à-dire,

pendant les grandes glaciations, sont rares et méritent une protection. Cette double question de la reconnaissance de ces formes périglaciaires originales, les sols polygonaux, et celle de leur intérêt pour être mis en protection, est abordée dans ce travail à propos du site du col du Noyer, à 1664 m, en bordure du massif du Dévoluy.

Site étudié : les sols polygonaux du col du Noyer, Dévoluy (Hautes-Alpes)

- 4 Le Dévoluy (Figure 1) est le plus haut des massifs préalpins français. Une grande partie de ses crêtes et versants sont en situation de haute montagne, en particulier sur son flanc méridional, avec le plateau de Bure juché à plus de 2550 m d'altitude et offrant une surface de 4 km². Entre les Alpes du Nord et les Alpes du Sud, ce massif est situé entre le Vercors à l'ouest et les Écrins à l'est. Il est à cheval sur les départements des Hautes-Alpes, de l'Isère et de la Drôme. Il est limité à l'est et au nord par la vallée du Drac et ses affluents dont l'Ébron, au sud par le petit Buëch et à l'ouest par la vallée du Buëch et le col de la Croix Haute, dans le prolongement du Trièves. Le massif est organisé selon une longue gouttière, drainée par la Souloise, orientée N-S, bordée par deux hautes crêtes : à l'ouest le Grand Ferrand (2761 m) et l'Obiou (2789 m) ; à l'est la crête dominée par la montagne de Faraut (2568 m) et bordée au sud par le plateau de Bure culminant à plus de 2700 m. Ce massif correspond à une structure synclinale dans des séries sédimentaires culminant avec le Crétacé sénonien (ère Mésozoïque).
- 5 Ce massif est soumis à plusieurs influences climatiques, des flux du nord, de l'ouest et en provenance des remontées d'air méditerranéen. Son climat est théoriquement lié à la situation de transition entre Alpes du nord et du sud, mais l'isolement et l'effet de gouttière N-S bloquée au sud par le plateau de Bure donne une ambiance marquée par des précipitations neigeuses abondantes et des conditions froides. Cette disposition topographique crée une variété des conditions bioclimatiques et fait du Dévoluy un territoire riche en habitats et en espèces. Le Dévoluy est connu pour sa flore remarquable avec 1/3 des espèces de plantes supérieures indigènes de France métropolitaine (Ptéridophytes, Gymnospermes, Chlamydospermes et Angiospermes) dont de nombreuses endémiques (*Carduus aurosicus* Chaix 1785, *Iberis aurosica* Chaix 1785). Ces caractéristiques exceptionnelles concourent à diverses labellisations dont Natura 2000.

Figure 1 : Schéma de localisation du col du Noyer, Dévoluy, France



A- Carte de localisation du Dévoluy et de son contexte régional (1. Ligne de crête, crêtes calcaires ; 2- sommets ; 3. Rivières) ; B- Le sud-est du Dévoluy, source Géoportail ; C- Le col du Noyer (flèche et point A : localisation des sols polygonaux), source Géoportail ; D- Les sols polygonaux sur le versant sud du col du Noyer.

Crédits : (A) P. Pech ; (B) © IGN-Géoportail ; (C) © IGN-Géoportail ; (D) Photo E. Hustache.

- 6 Le massif a donc une configuration originale qui en a déterminé un certain isolement puisque ouvert au nord par le défilé de la Souloise, au sud-ouest par la vallée étroite de la Béoux et à l'est au niveau d'un seul col équipé d'une route, le col du Noyer. Situé à 1664 m d'altitude, celui-ci correspond à l'abaissement d'axe de la crête orientale et fait la jonction entre le cœur du Dévoluy et le Drac, à l'est. Ce col, entre Champsaur et Dévoluy, est dominé par des parois rocheuses toujours affectées par l'éboulissement mais ayant produit des dépôts de pente remaniés par la solifluxion et les avalanches. Ces formes de versants héritées sont conquises par la végétation. Le bas des versants est donc constitué de formes en pente douce souvent occupées par des parcours pastoraux comme la plupart des versants du Dévoluy dont une des spécialités agricoles est l'élevage ovin. Cependant, ce col, qui figure comme un des grands cols alpins, est très fréquenté, non seulement par les promeneurs pendant la période estivale, mais aussi par les véhicules à moteur, quads, motos ou voitures, qui empruntent les pentes douces du col. On peut ajouter l'augmentation de la fréquentation et des piétinements voire l'occupation par les voitures lors d'événements médiatiques comme le Tour de France ou d'autres courses cyclistes et le rallye de Monte Carlo. C'est au niveau de ce col, en face du restaurant et refuge Napoléon qu'ont été repérés en 2016 les sols polygonaux fossiles, par l'animateur Natura 2000, Eric Hustache, rattaché au SMIGIBA, Syndicat mixte de gestion intercommunautaire du Buëch et de ses affluents. Sa démarche a consisté à contacter et susciter l'ensemble des chercheurs, géographes et écologues, qui

ont travaillé ensemble pour aboutir à cet article dont l'objet consiste à mettre en évidence l'intérêt scientifique du site.

Méthodes d'étude

- 7 Notre objectif était de déterminer s'il s'agit bien de sols polygonaux hérités, l'altitude ne permettant pas l'expression de processus périglaciaires actifs. Toutefois l'objectif consiste aussi à prospecter si ces sols polygonaux ne constituent pas des habitats intéressants pour leur biodiversité floristique. Cette approche globale du milieu naturelle, ou approche géoécologique (Stallins, 2006 ; Pech *et al.*, 2007 ; Huc, 2008 ; Pech, 2013) privilégie ici deux types de méthodes : des méthodes morphopédologique, morphométrique et anthracologique et des méthodes d'écologie végétale. La démarche a consisté à analyser tout le versant sur lequel ont été répertoriés les sols polygonaux mais aussi à se focaliser sur trois sols polygonaux afin d'étudier les paramètres géoécologiques retenus.

Analyse morphopédologique, morphométrique et anthracologique

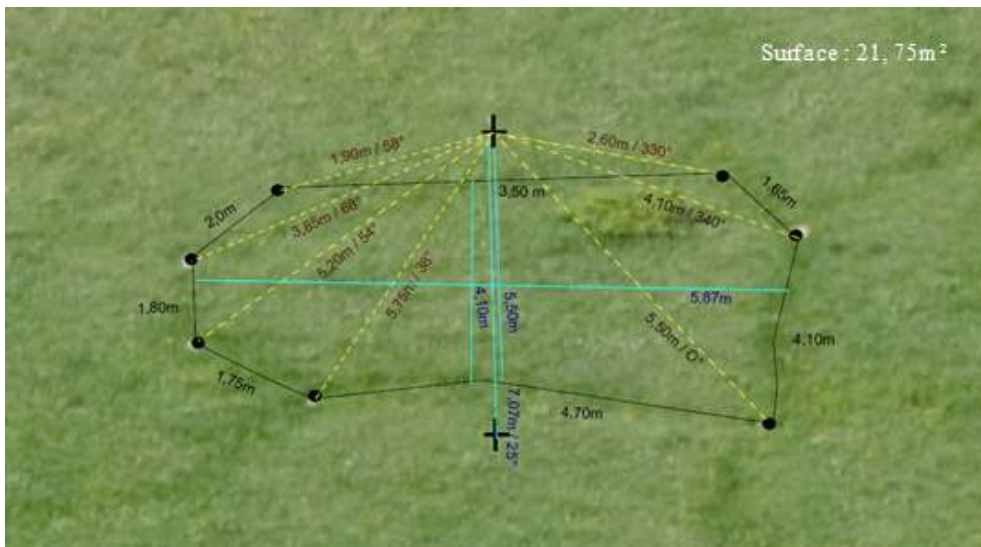
- 8 La démarche a consisté à recenser et cartographier les formes de sols polygonaux puis à se focaliser sur trois unités morphopédologiques. Une carte des sols polygonaux au Col du Noyer a été réalisée par photo-interprétation à partir d'orthophotographie à haute précision de l'IGN en utilisant le logiciel QGIS 2.18 LTR - Las Palmas (2018). Ces données ont permis de recenser de manière exhaustive les polygones et d'en produire une analyse statistique descriptive. Des paramètres morphométriques et des profils topographiques (Figure 2 et 3) ont été relevés sur trois polygones choisis pour leur significativité dans la population recensée. Nous avons réalisé des coupes topographiques précises sur les trois sols polygonaux retenus afin de préciser la morphologie de surface et de la comparer aux données des relevés floristiques.
- 9 Pour effectuer des prélèvements en vue de la réalisation d'une lame mince ainsi que des prélèvements d'échantillon en vue d'une analyse anthracologique, une fosse pédologique limitée a été creusée à la jonction de deux sols polygonaux, sur environ 80 cm de profondeur et 2 m de longueur sur 50 cm de largeur (Fig. 4). Le but était de prélever des portions de sols dans cette fosse pour effectuer une analyse granulométrique, des lames minces en vue d'une analyse micromorphologique et une analyse anthracologique exploratoire pour documenter l'histoire forestière passée du site (Fig. 4). Les prélèvements ont été effectués sans perturber la topographie du sol qui a été reconstitué après étude en coupe : en deux ans, la physionomie du site avait été reconstituée.

Figure 2 : Localisation des trois sols polygonaux retenus pour l'analyse des paramètres morphopédologiques et floristiques, Dévoluy, col du Noyer



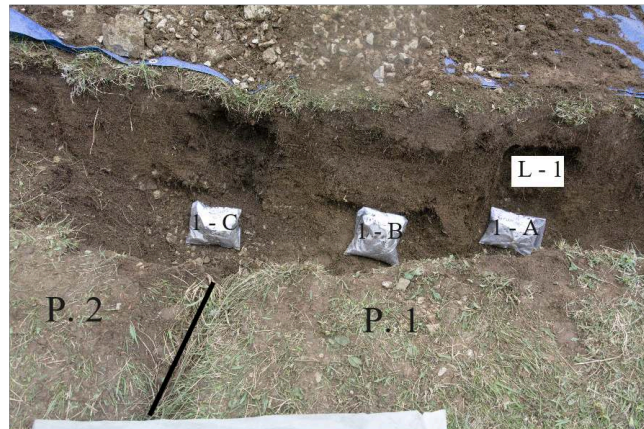
Cliché : M. Ajinca.

Figure 3 : Paramètres morphométriques relevés sur les trois sols polygonaux, Dévoluy, col du Noyer



Cliché : M. Ajinca.

Figure 4 : Fosse pédologique à la jonction de deux polygones, avec vue sur les prélèvements pour analyse granulométrique, col du Noyer, 23/05/2018



L1. Prélèvement pour lame mince ; 1-A, 1-B ; 1-C. Prélèvements pour étude granulométrique ; P1 et P2 et trait noir : limite entre deux polygones, prélèvements pour analyse anthracologique.

Cliché : M. Ajinca.

- 10 Pour l'analyse micromorphologique, nous avons collecté un échantillon de sol à 50 cm de profondeur dans une boîte hermétique en plastique (Fig. 4). Le protocole a consisté à déshydrater l'échantillon en étuve à 100°C puis à l'imprégner dans une résine, selon les protocoles préconisés par les pédologues (cf. *L'analyse du sol, échantillonnage, instrumentation et contrôle*, 1998, Pansu M., Gautheron J., Loyer J-Y., Paris, Masson, 513 p.). Après imprégnation, les blocs en résine ont été sciés et polis puis observés à la loupe binoculaire. Les photos ont été prises avec un grossissement x 40. L'analyse granulométrique, effectuée au sein de l'UMR LGP 8591, a permis de déterminer la taille des éléments constituant trois échantillons prélevés dans la fosse (Fig. 4).
- 11 L'analyse anthracologique a été effectuée à l'UMR IMBE de Aix-Marseille (UMR CNRS 7263-IRD 237) par Brigitte Talon, qui a réalisé deux prélèvements distincts dans la fosse : le premier au centre du polygone (prélèvement P 1 à trois profondeurs différentes : 10-20, 20-30 et 30-40 cm) et le second (correspondant à 1-C sur le cliché de la Fig. 4) au niveau des bordures (prélèvement P 2 à 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur). Ces échantillons ont été tamisés à l'eau sur une colonne de 3 tamis (2 mm, 800 µm et 400 µm) et les charbons extraits par flottation et mis à sécher (Talon, 2010). Une centaine de fragments ont été récoltés et la moitié d'entre eux identifiés en microscopie épiscopique.

L'analyse de la flore sur les sols polygonaux

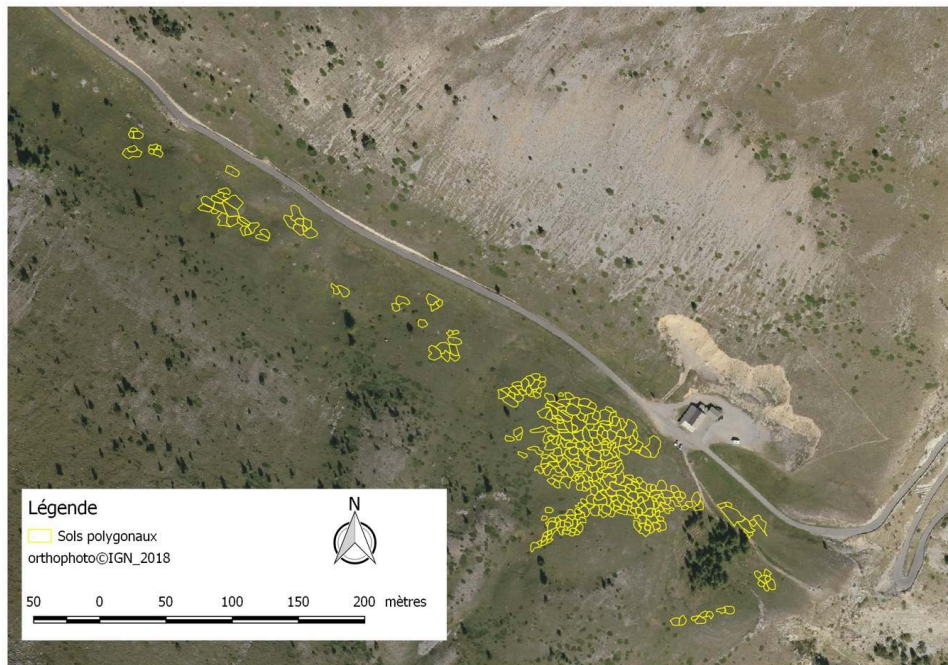
- 12 L'analyse de la flore sur les sols polygonaux a pour objectif de déterminer l'intérêt de ces sols en tant qu'habitats. Elle comprend une analyse de la diversité floristique des sols polygonaux et une analyse physionomique des plantes. L'analyse des données floristiques a été effectuées en utilisant deux indices, l'indice Shannon et l'indice Sørensen.
- 13 L'indice Shannon exprime la diversité des espèces qui compose la flore dans un milieu (Konopinski, 2020). Sa formule est :
- 14 $H' = -\sum [(ni/N) \times \log_2 (ni/N)]$

- 15 où H' représente la diversité spécifique, Σ la somme des résultats obtenus pour chacune des espèces présentes, n_i l'effectif de l'espèce i du milieu étudié, N le nombre total d'individus en considérant toutes les espèces et \log_2 le logarithme en base 2. Cet indice permet de quantifier l'hétérogénéité d'un site et sa richesse en espèces. Pierre Pech a effectué, le 11 juillet 2020, 24 relevés sur des quadrats de 1 m x 1 m, 12 sur les trois polygones étudiés et 12 sur trois sites situés sur les pelouses au-dessus des polygones (Fig. 2). Les quadrats sur les polygones ont été volontairement placés en intégrant une des bordures de chaque polygone. L'indice de similitude de Sørensen est $= 2c / (S1+S2)$, où $2c$ est le nombre d'espèces communes entre les deux échantillons, $S1$ est le nombre total d'espèces présentes dans le premier échantillon, $S2$ est le nombre total d'espèces présentes dans le deuxième. L'indice de Sorensen est une mesure simple de la biodiversité. Ce coefficient varie de 0 à 1. Il prend la valeur 0 quand il n'y a pas d'espèces communes entre les deux échantillons et la valeur 1 lorsque les deux échantillons ont exactement les mêmes espèces. Une faible similitude résulte d'une différence dans la composition et la physionomie de la végétation, et inversement pour une forte similitude. Ce coefficient de similitude permet de quantifier le degré d'association de deux entités. Contrairement aux autres indices de similitude celui-ci pondère par 2 le terme de co-occurrence. De plus c'est un indice de similitude asymétrique. C'est-à-dire qu'il ne considère pas que la double absence d'une même espèce, au sein de deux échantillons distincts, est une ressemblance, contrairement aux indices de similitudes symétriques (Chao *et al.*, 2006).
- 16 Trois transects divisés en 5 quadrats de 50 cm par 50 cm ont été effectués sur 3 polygones du Col du Noyer (Fig. 2) par Sylvain Abdulhak botaniste (CBNA), en juin 2018. Pour chaque polygone un quadrat est placé au milieu, deux quadrats en bordure et les deux autres en position intermédiaire entre le milieu et les bordures. Ces transects sont couplés à des relevés de hauteur moyenne de végétation. Le but est de déterminer le coefficient d'abondance de chaque végétal à différentes positions dans un polygone pour savoir si sa microtopographie détermine la physionomie et la composition du cortège floristique. Pour vérifier cette hypothèse un traitement statistique est effectué. Notre hypothèse est que la microtopographie des sols polygonaux a une influence sur l'hétérogénéité du cortège floristique. Les quadrats en bordure (Q1 et Q5) devraient être les plus similaires entre eux et les quadrats en périphérie (Q2 et Q4) également. Pour vérifier à cette hypothèse nous avons utilisé l'indice de Sørensen.

Résultats

L'analyse morphopédologique et anthracologique des sols polygonaux

Figure 5 : Repérage par photointerprétation des sols polygonaux du col du Noyer (Dévoluy, Hautes-Alpes)



Coordonnées géographiques du col avec le refuge Napoléon : Lat. 44,692073°, Long. 5,986176°.

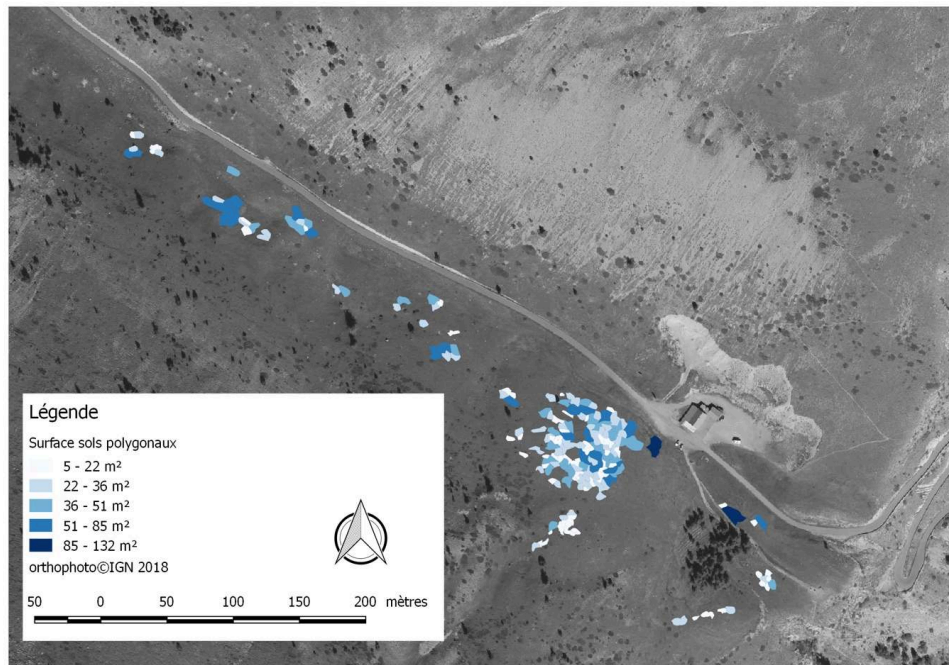
Source : photo © IGN-2018.

- 17 L'analyse par photointerprétation débouche sur un inventaire de 342 polygones cartographiés à l'aide du logiciel QGIS (Fig.5 et 6). Ce logiciel permet le calcul des surfaces et des périmètres des polygones dont les données sont rassemblées dans le Tableau 1. Nous y avons ajouté le diamètre des polygones. Quelques polygones sont de très grande taille, dépassant par exemple 80 m² et plus de 5 m de diamètre mais dans l'ensemble les données montrent l'homogénéité de ces sols polygonaux qui sont plus grands que les polygones actifs actuellement dans les Alpes : par exemple les diamètres des sols polygonaux de la Haute vallée de l'Ubaye et de la Mortice mesurent entre 0,8 et 1,5 m de diamètre (CNRS Caen, 1980).

Tableau 1 : Moyenne et médiane des surfaces (S²), des périmètres (P) et des diamètres (D) des 342 polygones du col du Noyer (Hautes-France), calcul effectué avec le logiciel QGIS

	S ²	P	D
Moyenne	28,8	22,7	3,6
Médiane	24,75	21,44	3,4
Ecart-type	17	7,3	1,2

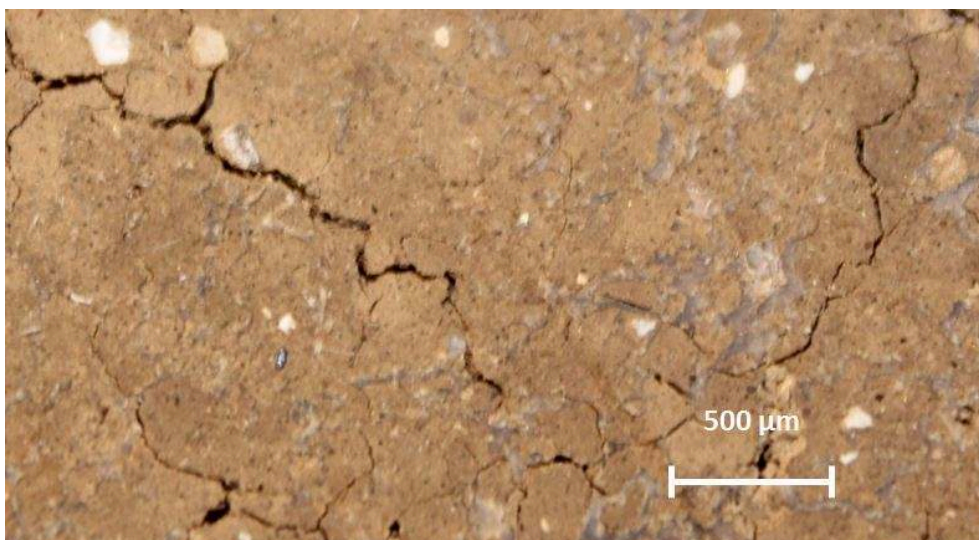
Figure 6 : Répartition des sols polygonaux avec les catégories de superficies (cartographie effectuée avec QGis)



Source : photo © IGN-2018.

- 18 L'analyse micromorphologique sur lame mince (Fig. 7) des échantillons du sol révèle une structure limoneuse compacte en agrégats, de type granulaire liée à la cryoturbation (Pissart, 1969 ; Van-Vliet, 1982, 1995 ; Frenot *et al.*, 1995).

Figure 7 : Lame mince orientée verticalement d'un échantillon du sol de polygone au col du Noyer, Dévoluy, Hautes-Alpes



Cliché P. Pech.

- 19 L'analyse granulométrique est présentée dans le Tableau 2. Il est clair qu'il y a un tri des sédiments. Les éléments plus grossiers comme les galets se concentrent dans les bordures (63 %) et sont moins présentes dans la partie centrale (23 %). À l'inverse on a

un gradient croissant des éléments fins (limons et argiles) des bordures (11,5 %) au centre (33,5 %) où ils sont plus abondants. Dans la partie centrale, les conditions sont donc plus favorables à la formation de lentilles de glace, ce qui est logique car, d'après les travaux de Van Vliet-Lanoë (1982 et 1995), les limons ont une capacité maximale de ségrégation de la glace. Ces sols sont ainsi capables de gonfler car ils retiennent mieux l'eau ce qui augmente leur susceptibilité au gel. *A contrario* les sables et graviers ont une potentialité minimale de ségrégation de la glace. D'après ces résultats on peut conclure qu'il y a dans ce polygone un triage sédimentaire du centre aux bordures (D'Amico *et al.*, 2019).

- 20 Tableau 2 : Analyse granulométrique de 3 échantillons de sols pris au col du Noyer dans un sol polygonal, du centre (G1 A) à la périphérie, au niveau des fentes (G1 C) et en intermédiaire (G2 B)
- 21 L'analyse anthracologique des prélèvements P1 et P2 a permis d'analyser une centaine de petits charbons de bois, d'une taille comprise entre 2 mm et 400 μ m. 54 ont pu être identifiés avec précision, les autres restant indéterminables, soit en raison de leur taille soit en raison de leur état de conservation. Ces charbons proviennent essentiellement d'essences de conifères : le sapin (*Abies alba* Mill.), le pin, *Pinus* « type *sylvestris/unicinata* (à ce jour, il n'est anatomiquement pas possible de distinguer anatomiquement le pin sylvestre du pin à crochets) et un genévrier (*Juniperus* sp.). Notons également la présence d'un charbon d'érable (*Acer* sp.) identifié dans le niveau supérieur P1.

Tableau 3 : Analyse anthracologique des 5 échantillons de sols pris au col du Noyer dans un sol polygonal, au centre (P1) et au niveau des fentes (P2)

Échantillons	Poids total (g)	Poids fraction > 20 mm (g)	Poids fraction comprise entre 20 mm et 2 mm (g)	Poids fraction comprise entre 2mm et 50 μ m	Poids fraction < 50 μ m (g) déduit	Poids fraction < 50 μ m (g) pesé	Poids récupéré
G1A centre du polygone	685,43	158,94	215,49	23,81	287,19	230,23	628,47
G1B	1 204,03	332,99	277,72	38,05	555,27	292,3	941,06
G1C bord du polygone	1 098,23	695,94	274,48	6,93	121,18	126,68	1103,73

- 22 Ces résultats révèlent la présence passée sur le site de plusieurs essences arborescentes, comme *Abies* bien représenté dans les deux prélèvements et de *Pinus t. sylvestris/unicinata* et *Juniperus*, qui sont en revanche un peu plus fréquents dans P2. Est-ce un hasard si les fragments de *Juniperus* n'ont été retrouvés qu'au niveau des bordures du polygone (prélèvement P2) et celui de *Acer* au centre (prélèvement P1)? Il n'est malheureusement pas possible avec si peu de matériel anthracologique et une seule fosse échantillonnée de tenter une interprétation plus robuste de ces premiers résultats. Cette analyse exploratoire confirme cependant le potentiel de la discipline mise en œuvre et l'intérêt paléoécologique du site en termes de reconstitution des conséquences des activités humaines sur la végétation passée.

L'analyse floristique

- 23 Cette analyse vise à déterminer si les sols polygonaux ont un impact sur la flore. La totalité des milieux autour des sols est constituée de pelouses (Fig. 2). Les relevés floristiques ont été établis en deux étapes, l'une permettant de connaître la biodiversité alpha calculée à l'aide de l'indice Shannon et l'autre pour la biodiversité beta à l'aide de l'indice Sørensen. Des hauteurs de la strate herbacée complètent ces analyses.
- 24 Pour les données et les calculs permettant le calcul des indices Shannon, d'après le Tableau 4, il est aisé de constater que les valeurs sont plus importantes sur les sols polygonaux que sur la pelouse située en dehors des secteurs des polygones (Fig. 2).

Tableau 4 : Valeurs des indices Shannon pour les trois polygones étudiés (P1, P2, P3) et pour trois sites échantillonnés dans la pelouse (Fig. 2)

P1		A	B	C	D	Total
	N	21	23	26	22	92
	ni / N	0,22826087	0,25	0,2826087	0,23913043	
	$\log_2 (ni / N)$	-2,13124453	-2	-1,82312224	-2,06413034	
	H'=shannon	-0,48647973	-0,5	-0,5152302	-0,49359639	1,99530631
P2		A	B	C	D	Total
	N	23	25	26	22	96
	ni / N	0,23958333	0,26041667	0,27083333	0,22916667	
	$\log_2 (ni / N)$	-2,06140054	-1,94110631	-1,88452278	-2,12553088	
	H'=shannon	-0,49387721	-0,50549644	-0,51039159	-0,48710083	1,99686606
P3		A	B	C	D	Total
	N	26	21	22	25	94
	ni / N	0,27659574	0,22340426	0,23404255	0,26595745	
	$\log_2 (ni / N)$	-1,85414913	-2,16227143	-2,09515723	-1,91073266	
	H'=shannon	-0,51284976	-0,48306064	-0,49035595	-0,50817358	1,99443993
S1		A	B	C	D	Total
	N	11	21	7	8	47
	ni / N	0,23404255	0,44680851	0,14893617	0,17021277	
	$\log_2 (ni / N)$	-2,09515723	-1,16227143	-2,74723393	-2,55458885	

	H'=shannon	-0,49035595	-0,51931277	-0,4091625	-0,43482363	1,85365485
S2		A	B	C	D	Total
	N	9	11	18	7	45
	ni / N	0,2	0,24444444	0,4	0,15555556	
	$\log_2 (ni / N)$	-2,32192809	-2,03242148	-1,32192809	-2,68449817	
	H'=shannon	-0,46438562	-0,49681414	-0,52877124	-0,4175886	1,9075596
S3		A	B	C	D	Total
	N	6	8	21	3	38
	ni / N	0,15789474	0,21052632	0,55263158	0,07894737	
	$\log_2 (ni / N)$	-2,66296501	-2,24792751	-0,85561009	-3,66296501	
	H'=shannon	-0,42046816	-0,4732479	-0,47283716	-0,28918145	1,65573466

Les colonnes A, B, C, D correspondent aux 4 quadrats dans lesquels ont été échantillonnées les plantes.

- 25 La figure 8 représente les valeurs de présence et d'absence des espèces de plantes déterminées sur l'ensemble des trois transects effectués sur les sols polygonaux retenus dans notre analyse. Les calculs des indices de Sørensen ont été effectués sur les trois quadrats étudiés sur les trois sols polygonaux retenus. Le but est de croiser les résultats pour vérifier la similitude des échantillons analysés en relation avec l'emplacement dans les polygones.

Figure 8 : répartition par présence-absence des espèces recensées sur les cinq quadrats effectués sur trois transects sur les trois sols polygonaux du col du Noyer (Hautes-Alpes)

Espèces	T1 Q1	T1 Q2	T1 Q3	T1 Q4	T1 Q5	T2 Q1	T2 Q2	T2 Q3	T2 Q4	T2 Q5	T3 Q1	T3 Q2	T3 Q3	T3 Q4	T3 Q5
<i>Achillea millefolium</i>															
<i>Agrostis alpina</i>															
<i>Agrostis capillaris</i>															
<i>Alochemilla alpigena</i>															
<i>Alochemilla glabrescens</i>															
<i>Asteranema dioica</i>															
<i>Arthyria montana</i>															
<i>Arthyria vulniferata</i> subsp. Guyoti															
<i>Asplenium conopsea</i>															
<i>Astragalus danicus</i>															
<i>Avenula pubescens</i>															
<i>Bryochymum lunata</i>															
<i>Bromus erectus</i>															
<i>Campanula rotundifolia</i>															
<i>Carex caespitosa</i>															
<i>Carex sp.</i>															
<i>Cerfina aculeata</i>															
<i>Cichium aculeata</i>															
<i>Dacera corymbosa</i>															
<i>Helictichiton sedenense</i>															
<i>Eragrostis sp.</i>															
<i>Euphorbia cyparissias</i>															
<i>Festuca leucogala</i>															
<i>Festuca rubra</i>															
<i>Festuca violacea</i>															
<i>Galium boreale</i>															
<i>Galium comutum</i>															
<i>Galium verum</i>															
<i>Gentiana verna</i>															
<i>Gibbularia conopsea</i>															
<i>Helianthemum italicum</i>															
<i>Koeleria macrantha</i>															
<i>Leontodon hispidus</i>															
<i>Leontodon sylvaticus</i>															
<i>Linum catharticum</i>															
<i>Lolium alpinum</i>															
<i>Luzula multiflora</i>															
<i>Wardia stricta</i>															
<i>Pilosella lactucella</i>															
<i>Plantago atrata</i>															
<i>Plantago media</i>															
<i>Plantago serotina</i>															
<i>Poa alpina</i>															
<i>Potentilla verna</i>															
<i>Ranunculus acris</i>															
<i>Scilla montana</i>															
<i>Scilla caerulea</i>															
<i>Galium alpicum</i>															
<i>Taraxacum officinale</i>															
<i>Taraxacum sp.</i>															
<i>Thymus polygoides</i>															
<i>Trifolium montanum</i>															
<i>Trifolium pratense</i>															
<i>Trifolium thalictroides</i>															
<i>Arenaria mescolea</i>															
<i>Vicia cracca</i> subsp. Cracca															
<i>Viola calcareata</i>															
<i>Viola sp.</i>															

Q1 et Q5 correspondent aux bordures des sols polygonaux ; Q3 correspondent aux centres des sols polygonaux.

Réalisation : P. Pech, M. Ajinca, S. Abdulhak, E. Hustache, L. Simon, B. Talon.

- 26 D'après le tableau 5, les similarités sont globalement fortes sur ces sols polygonaux. Cependant, les espèces sont les plus homogènes sur les parties centrales des sols polygonaux. Les similarités sont les plus faibles lorsqu'on compare les quadrats des bordures et ceux des centres des sols polygonaux. Il y a bien un impact de la morphologie des sols polygonaux sur la répartition des plantes.

Tableau 5 : indices de similarité de Sørensen calculés sur les sols polygonaux du col du Noyer (Hautes-Alpes)

	T1Q1	T1Q2	T1Q3	T1Q4	T1Q5
T1Q1	1	0,696	0,741	0,692	0,64
T1Q2	0,696	1	0,667	0,609	0,545
T1Q3	0,741	0,667	1	0,704	0,577
T1Q4	0,692	0,609	0,704	1	0,76
T1Q5	0,64	0,545	0,577	0,76	1
	T2Q1	T2Q2	T2Q3	T2Q4	T2Q5
T2Q1	1	0,537	0,636	0,513	0,636
T2Q2	0,537	1	0,732	0,833	0,488

T2Q3	0,636	0,732	1	0,769	0,545
T2Q4	0,513	0,833	0,769	1	0,462
T2Q5	0,636	0,488	0,545	0,462	1
	T3Q1	T3Q2	T3Q3	T3Q4	T3Q5
T3Q1	1	0,643	0,704	0,692	0,755
T3Q2	0,643	1	0,577	0,72	0,549
T3Q3	0,704	0,577	1	0,667	0,735
T3Q4	0,692	0,72	0,667	1	0,596
T3Q5	0,755	0,549	0,735	0,596	1
	moyenne Q1	moyenne Q2	moyenne Q3	moyenne Q4	moyenne Q5
moyenne Q1	1	0,625333333	0,693666667	0,632333333	0,677
moyenne Q2	0,625333333	1	0,658666667	0,720666667	0,527333333
moyenne Q3	0,693666667	0,658666667	1	0,713333333	0,619
moyenne Q4	0,632333333	0,720666667	0,713333333	1	0,606
moyenne Q5	0,677	0,527333333	0,619	0,606	1

Les quadrats Q1 et Q5 correspondent aux bordures des sols et Q2, Q3 et Q4 correspondent aux centres. Les valeurs en gras normales sont les plus fortes et les valeurs en gras en italiques correspondent aux plus faibles.

Discussion

- 27 L'interprétation des données impose de prendre en compte le contexte morphodynamique. Les replats concernés par ces polygones sont situés dans un contexte de dépôts de pente lités classiques sous corniche rocheuse largement dominés par les calcaires du Tithonien produisant avant tout des tabliers d'éboulis constitués, en coupe, de gélifracts organisés en lentilles alternativement maigres, de structure ouverte, et grasses, renfermant une matrice fine plus abondante de texture limono-sableuse. Dans leur partie distale, ces cônes d'éboulis sont relayés par des formes aux pentes plus douces (pente inférieure à 10-15°) où sont développés les polygones. En coupe et dans l'analyse micromorphologique, la concentration des limons témoigne d'une action de la glace de ségrégation (Washburn, 1979 ; Van Vliet-Lanoë, 1982 et 1995 ; Frenot *et al.*, 1995). Cette glace de ségrégation agit aussi dans le transfert des éléments grossiers vers la partie superficielle de la formation (Pissart, 1969 ; Van Vliet-Lanoë, 1982 et 1995 ; Frenot *et al.*, 1995). Les éléments d'organisation sont ici reconnus comme étant caractéristiques de conditions périglaciaires (Pissart, 1969 ; Washburn, 1979 ; Van Vliet-Lanoë, 1982 et 1995 ; O'Neil et Burn, 2012). Celles-ci succèdent à des

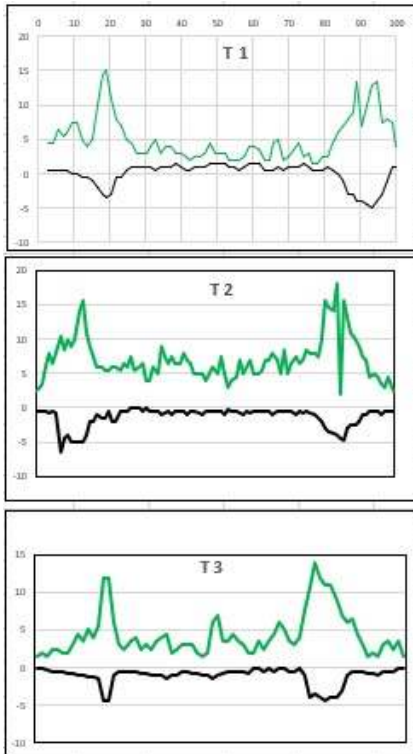
remaniements des fines dans les parties distales des éboulis mais elles témoignent de l'action de conditions périglaciaires actives pendant un temps suffisamment long pour avoir permis la migration des éléments grossiers en surface des polygones sous l'effet de la cryoexpulsion (Van Vliet-Lanoë, 1982 et 1995 ; Frenot *et al.*, 1995). Dans la genèse des sols polygonaux, les processus sont dominés par l'action de l'eau gelée dans les porosités (Washburn, 1979). Cette glace de ségrégation agit aussi en réorganisant le sol qui subit un tri granulométrique concentrant une forte proportion d'éléments fins (sables, limons, argiles) dans la partie supérieure. En surface, les blocs sont soulevés par des aiguilles de glace qui favorisent la migration vers les bordures des polygones constituées de fentes de cryodessiccation liées au gel (Van-Vliet, 1995). Le bombement cryogénique se fait préférentiellement dans la partie centrale des sols là où se situent les éléments fins. *A contrario*, sur les bordures, se trouvent des fentes de cryodessiccation, là où s'accumulent les éléments grossiers, notamment les blocs (Pissart, 1969 ; Van Vliet-Lanoë, 1982, 1995 ; Frenot *et al.*, 1995).

- 28 Les relevés de la topographie des sols du col du Noyer et les résultats des analyses granulométriques confirment qu'il s'agit bien de sols polygonaux. Mais il s'agit de sols polygonaux hérités. Les sols polygonaux résultent d'un complexe d'actions du gel dans le sol (D'Amico *et al.*, 2019) dans des conditions périglaciaires qui n'existent pas dans cette ampleur actuellement dans les Alpes. Par comparaison les polygones actuellement recensés dans les Alpes sont de taille plus réduite, de l'ordre de quelques m² (CNRS Caen, 1980 ; D'Amico *et al.*, 2019). La mise en place de sols polygonaux plurimétriques correspond à des conditions climatiques froides, avec la constitution d'un pergélisol profond (D'Amico *et al.*, 2019), qui ont régné au cours de la dernière glaciation du Pléistocène qu'on appelle Würm dans les Alpes (Montjuvent, 1973). S'il est certain que les Alpes, dans le secteur étudié, étaient très largement englacées au cours de ces phases, le glacier de la Durance passait au sud-est du Dévoluy (Jorda *et al.*, 2000) envoyant une transfluence dans le bassin isérois par le col Bayard, celui du Drac passait à l'est, en contrebas du col du Noyer, et mise à part une couverture de glace limitée au plateau de Bure et aux vallons qui en descendent, les reliefs du Dévoluy, dont le col du Noyer, étaient non englacés mais fortement soumis à des conditions périglaciaires (Montjuvent, 1973). Des études faites à Séchilienne, au sud-est de Grenoble, dans le massif Belledonne à quelques kilomètres du Dévoluy, ont avancé qu'il y a 21 000 ans la température moyenne de l'air était de -8° C à -10° C (Lebrouc *et al.*, 2013), donc associée à un pergélisol continu et profond (Lebrouc *et al.*, 2013). À certains endroits, non englacés, se trouvaient des paysages découverts, marqués par une intense activité périglaciaire. Les versants du col du Noyer auraient donc pu être, au maximum de la glaciation, soumis à un contexte périglaciaire à pergélisol épais. Les polygones ne sont donc plus fonctionnels, hérités de la dernière phase la plus froide de la période glaciaire, il y a environ 20 000 ans (Jorda *et al.*, 2000 ; Lebrouc *et al.*, 2013). Ils en sont les témoins.
- 29 Durant la période post-glaciaire, le réchauffement est assez rapide, surtout après -10 000 ans (Jorda *et al.*, 2000) et se traduit par le développement d'une forêt claire d'abord constituée de pins et d'arbustes, avant de laisser la place à partir de -9000 ans au sapin (Muller *et al.*, 2007). La sapinière, rapidement enrichie de feuillus, dont l'érable, recouvre le versant et les polygones. Les analyses anthracologiques confirment la présence de ces différentes essences, alors que le paysage actuel est constitué de pelouses anthropiques liées au développement du pastoralisme attesté au niveau de

Lus-la-Croix-Haute il y a 5000 ans par des traces de brûlis et l'augmentation de pollens marqueurs de l'anthropisation (Argant, 2004). Des datations absolues de quelques charbons de bois sont envisagées pour permettre de reconstituer la chronologie de la recolonisation forestière avant les défrichements et pour établir des liens avec les données observées au col de Lus-la-Croix-Haute. En effet, ce sont les défrichements liés au développement de l'activité pastorale (Jorda *et al.*, 2000 ; Argant, 2004) qui ont révélé ces paysages de sols polygonaux hérités qui ont perduré malgré le développement successif de couverts forestiers puis de défrichements. Ces sols polygonaux bien présents, ont-ils cependant des impacts sur les paysages végétaux actuels ?

- 30 L'analyse floristique démontre que, au niveau des sols polygonaux, l'hétérogénéité des microtopographies et de leurs compositions granulométriques favorisent une diversité des espèces. Cela confirme que les sols polygonaux jouent un rôle favorable sur la biodiversité. La microtopographie des sols polygonaux a effectivement une influence sur le cortège floristique. D'après la Figure 9, la hauteur moyenne de la végétation est plus importante au niveau des bordures des sols polygonaux. Au niveau des bordures des polygones, on trouve une prédominance de poacées et plutôt des espèces végétales vivaces au centre des polygones. En outre, d'après les résultats de l'analyse de l'indice de biodiversité de Shannon (Tableau 4), le nombre des espèces est globalement plus faible sur la pelouse environnant les sols polygonaux. Cela prouve que les sols polygonaux jouent un rôle favorable pour accueillir une flore plus diversifiée. Les cœurs des polygones, constitués de limons, et les fentes remplies de blocs et de graviers, constituent des micro-habitats accueillant des espèces variées, beaucoup plus variées que sur la pelouse du reste du versant. L'indice de biodiversité est plus important sur les sols polygonaux.

Figure 9 : Profils topographiques et hauteurs des plantes le long des transects effectués sur les trois sols polygonaux du col du Noyer, Dévoluy



Courbes vertes : variations de la hauteur des plantes ; courbes noires : variations de la topographie du sol.

Réalisation illustration : P. Pech.

- 31 Pour le col du Noyer, il existe donc un complexe original formant un géomorphosite exceptionnel permettant d'observer des sols polygonaux relictuels. Ces sols sont en outre responsables d'une biodiversité liée à la fois à la forte diversité des espèces végétales mais aussi à l'hétérogénéité de leur assemblage sur les microhabitats que définissent les polygones.

Conclusion

- 32 Les paysages périglaciaires de montagnes, qu'ils soient actifs ou hérités, sont des témoins des conditions environnementales, notamment climatiques, actuelles ou passées mais aussi de leur évolution en cours (Feuillet, 2010 ; Feuillet et Sourp, 2011). Le programme ROCVEG a pour objectif d'identifier, de suivre et de préserver certains de ces milieux périglaciaires dans les Alpes (Bollati *et al.*, 2015). Les sols polygonaux sont rares dans le massif alpin (D'Amico *et al.*, 2019). Même s'il existe en haute montagne alpine des polygones encore actifs, à plus de 2500 m d'altitude, comme, dans les Hautes-Alpes, au pied de la crête de Vautisse dans les Écrins ou à la crête de La Mortice, dans le Queyras, voire au plateau de Bure dans le Dévoluy, ils sont limités à de rares sites. Leur dynamique actuelle mérite d'être intégrée au réseau des formes et des paysages périglaciaires suivis et protégés (Feuillet, 2010 ; Feuillet et Sourp, 2011).
- 33 Les paysages relictuels sont rares dans les Alpes et considérés comme originaux (D'Amico *et al.*, 2019). Leur préservation représente un enjeu pour la compréhension de

la présence de milieux froids, périglaciaires étendus lors des phases glaciaires à des altitudes actuellement à climat plus tempéré (Bridgland, 2013 ; Palma *et al.*, 2017). L'exemple du col du Noyer, situé à 1664 m d'altitude, constitue un conservatoire rare des conditions passées de formation des sols polygonaux. À la suite de ce que démontrent divers auteurs à propos de sites géologiques et géomorphologiques (Duval et Gauchon, 2010 ; Reynard *et al.*, 2011 ; Feuillet, 2010 ; Feuillet et Sourp, 2011), ces sols polygonaux méritent une protection et une valorisation scientifique et pédagogique.

- 34 Nous avons démontré que ces sols polygonaux sont actuellement favorables à une diversité floristique plus importante que le milieu de pelouse environnant, dont on sait d'ailleurs qu'il est lié aux défrichements et à l'activité pastorale (Argant, 2004). Il est donc possible de développer une approche intégratrice faisant jouer de manière réciproque les effets d'un bon état du milieu naturel (Kazuhisa *et al.*, 2018) agissant, au col du Noyer, à la fois pour préserver les sols polygonaux hérités et les formes riches et originales des dispositifs floristiques. Pour de nombreux auteurs, (Bollati *et al.*, 2015 ; Dubois *et al.*, 2015), la prise en compte de tous les éléments des composantes y compris le contexte abiotique renforce l'optimisation de la gestion conservatoire des écosystèmes, des fonctionnalités et des services écosystémiques. Il semble donc important de développer des observations multicritères et pluridisciplinaires pour mettre en évidence la valeur de ces sites complexes (Parks et Mulligan, 2010), notamment ceux qui combinent une valeur écologique et géomorphologique patrimoniale (Brown *et al.*, 2018). Les sols polygonaux du col du Noyer ont clairement une dimension patrimoniale. Il y a nécessité de travailler en partenariats, chercheurs et gestionnaires, opérationnels du développement local et protecteurs de la nature, autour de ces éléments, formes géomorphologiques et biodiversité y compris ordinaire. La patrimonialisation de sols polygonaux encore actifs dans les Alpes semble urgente parce que leur superficie diminue et en cela ils constituent des sentinelles des changements environnementaux en cours (Reed *et al.*, 2016). La patrimonialisation de ces mêmes formes héritées s'avère tout aussi importante. Ils sont des témoins de l'évolution du climat passé des Alpes : ils renseignent aussi sur les impacts positifs que peuvent avoir ces paléoformes sur la flore et sur une certaine biodiversité même ordinaire.

BIBLIOGRAPHIE

Argant J., 2004.- « Végétations holocènes et premières traces d'anthropisation dans le bassin du Rhône révélées par l'analyse pollinique », Néolithisation précoce. Premières traces d'anthropisation du couvert végétal à partir des données polliniques, Besançon, Presses Universitaires Franc-Comtoises, Annales Littéraires, 777, Série Environnement, Sociétés et archéologie, 7, p. 135-145

Biondi E., Casavecchia Simona, Pesaresi S., 2012.- "Natura 2000 and the Pan-European Ecological Network: a new methodology for data integration", *Biodiversity Conservation*, 21: 1741-1754

Bodin X., Schoeneich P., Deline P., Ravanel L., Magnin F., Krysiecki J.-M., Echelard T., 2015.- « Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés: évolutions récentes dans les Alpes françaises », *Journal of Alpine Research/Revue de géographie alpine* [En ligne] 103-2 2015, URL : <http://rga.revues.org/2806>

Bollati I., Leonelli G., Vezzola L., Pelfini M., 2015.- “The role of ecological value in geomorphosite assessment for debris-covered Miage Glacier (Western Italian Alps) based on a review of 2.5 centuries of scientific study”, *Geoheritage*, 7, pp. 119-135 <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0111-2>

Bridgland D.R., 2013.- “Geoconservation of Quaternary sites and interests”, *Proceedings of the Geologists' Association*, 124: 612-624

Brown E.J., Evans D.H., Larwood J.G., Prosser C.D., Townley H.C., 2018.- “Geoconservation and geoscience in England: a mutually beneficial relationship”, *Proceedings of the Geologists' Association*, 129: 492-504

Chao A., Chazdon R. L., Colwell R. K., Shen T. J., 2006.- “Abundance-based similarity indices and their estimation when there are unseen species in samples”, *Biometrics*, 62:361-371

CNRS Caen, 1980.- “Observations sur quelques formes et processus périglaciaires dans le Massif du Chambeyron (Alpes de Haute-Provence)”, *Revue de Géographie Alpine*, 68-4 : 349-382

D'Amico M.E., Pintaldi E., Catoni M., Freppaz M., Bonifacio E., 2019.- “Pleistocen periglacial imprinting on polygenetic soils and paleosols in the SW Italian Alps”, *Catena*, 174: 269-284

Debay P., Huc S., 2015.- *Ecosystèmes abyssaux : guide des espèces végétales caractéristiques*, Conservatoire botanique national alpin, 40 p.

Dubois L., Mathieu J., Loeuille N., 2015.- “The manager dilemma : optimal management of an ecosystem service in heterogeneous exploited landscapes”, *Ecological Modelling*, 301: 78-89

Duval M., Gauchon C., 2010.- « Tourisme, géosciences et enjeux de territoires », *Téoros*, [En ligne] 29-2 URL : <http://journals.openedition.org/teoros/870>

Feuillet T., 2010.- *Les formes périglaciaires dans les Pyrénées centrales françaises : analyse spatiale, chronologique et valorisation*. Thèse Doct., Univ. Nantes

Feuillet T., Sourp E., 2011.- “Geomorphological heritage of the Pyrenees National Park (France): assessment, clustering, and promotion of geomorphosites”, *Geoheritage*, 3(3), 151-162

Frenot Y., Van Vliet-Lanoë B., Gloaguen J.C, 1995.- “Particle translocation, and initial soil development on a glacier foreland, Kerguelen Islands”, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 27, 2: 107-115

Garcia-Lamas P., Calvo L., De la Cruz M., Suarez-Seoane S., 2018.- “Landscape heterogeneity as a surrogate of biodiversity in mountain systems: what is the most appropriate spatial unit?”, *Ecological Indicators*, 85: 285-294

Huc S., 2008.- « Mobilité des éboulis supraforestiers des Pyrénées orientales (France) : morphodynamique et marqueurs biologiques », *Géomorphologie*, 14 : 99-112

Johnson S.A., Ober H.K., Adams D.C., 2017.- “Are keystone species effective umbrellas for habitat conservation? Spatially explicit approach”, *Journal for Nature Conservation*, 37: 47-55

Jorda, M., Rosique, T., Evin, J., 2000. « Premières datations ¹⁴C de dépôts morainiques du Pléniglaciaire supérieur de la moyenne Durance (Alpes méridionales, France), Implications géomorphologiques, paléoclimatiques et chronostratigraphiques », *Compte rendue Acad. Des Sci.* 331/3, 187-188.

- Kazuhisa K., Monz C., Bard-Jorgen B., Hausner V.H., 2018.- "Role of site management in influencing visitor use along trails in multiple alpine protected areas in Norway", *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 22: 1-8
- Konopiński MK. 2020.- "Shannon diversity index: a call to replace the original Shannon's formula with unbiased estimator in the population genetics studies", *PeerJ*, 8:e9391 <http://doi.org/10.7717/peerj.9391>
- Lebrouc V., Schwartz., Baillet L., Jongmans D. et Gamond J.F., 2013.- "Modeling pergélisol extension in a rock slope since the last glacial maximum: application to the large Séchilienne landslide (French Alps)". *Geomorphology*, 198: 189-200
- Mathevet R. et Godet L. (sous dir.), 2015.- *Pour une géographie de la conservation, biodiversités, natures et sociétés*, Paris, L'Harmattan, 397p.
- Montjuvent G., 1973.- « La transfluence Durance-Isère. Essai de synthèse du Quaternaire du bassin du Drac (Alpes françaises), *Géologie Alpine*, 49 : 57-118
- Muller S.D., Nakagawa T., De Beaulieu J.-L., Court-Picon M., Carcaillet C., Miramont C., Roiron P., Bouterin C., Ali A.A., Bruneton H., 2007.- "Postglacial migration of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the southwestern Alps". *Journal of Biogeography*, 34, 876-899
- O'Neill H.B., Bum C.R., 2012.- "Physical and temporal factors controlling the development of near-surface ground ice at Illisarvik, western Arctic coast, Canada", *Canadian Journal of Earth Science*, 49: 1096-1110
- Palma P., Oliva M., Garcia-Hernandez C., Gomez Ortiz A., Ruiz-Fernandez J., Salvador-Franch F., Catarineu M., 2017.- "Spatial characterization of glacial and periglacial landforms in the highlands of Sierra Nevada (Spain)", *Science of the Total Environment*, 584-585: 1256-1267
- Parks K.E. et Mulligan M., 2010.- "On the relationship between a resource based measure of geodiversity and broad scale biodiversity patterns", *Biodiversity Conservation*, 19: 2751-2766
- Pech P., 2013.- *Les milieux rupicoles*, Paris, Quae, 160p.
- Pech P., Arques S., Jomelli V., Maillet I., Melois N., Moreau M., 2007.- "Spatial and temporal biodiversity in a high mountain environment : the case of the proglacial margin of Evettes, Natura 2000 area (Savoie, French Alps)", *Cybergeo : European Journal of Geography*, [Online] URL: <http://journals.openedition.org/cybergeo/6106>
- Pissart A., 1969.- « Le mécanisme périglaciaire dressant les pierres dans le sol. Résultats d'expériences ». *C.R.Acad. Sc.Paris*, 268, 3015-3017
- Reed D., Washburn L., Rassweiler A., Miller R., Bell T., Harrer S., 2016.- "Extreme warming challenge sentinel status of kelp forests as indicators of climate change", *Nature Communication*, 7, 13757, doi: 10.1038/ncomms13757
- Reynard E., Hobléa F., Cayla N., Gauchon C., 2011.- « Les hauts lieux géologiques et géomorphologiques alpins », *Revue de Géographie Alpine/Journal of Alpine Research* [En ligne] URL : <http://journals.openedition.org/rga/1412>
- Senzaki M., Yamaura Y., Yasushi S., Kubo T., Nakamura F., 2017.- "Citizens promote the conservation of flagship species more than ecosystem services in wetland restoration", *Biological Conservation*, 214: 1-5
- Stallins J.A., 2006.- "Geomorphology and ecology: unifying themes for complex systems in biogeomorphology", *Geomorphology*, 77: 207-216

- Talon B., 2010.- "Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in French southern Alps: evidence from soil charcoal", *The Holocene*, 20(1): 35-44
- Van Vliet-Lanoë B., 1982.- « Structures et microstructures créées par la glace de ségrégation ». In *The Roger Brown Memorial*, cr. 4th Canadian Permafrost Conference, Calgary, March 1981, H. French editor, NRC., 116-122.
- Van Vliet-Lanoë B., 1995.- « Solifluxion et transferts illuviaux dans les formations périglaciaires litées Etat de la question /Solifluction and translocation processes in bedded periglacial formations. State of the art. », *Géomorphologie, Processus et environnement*, 2, 85-113
- Washburn A.L., 1979.- *Geocryology. A survey of periglacial processes and environment*. Arnold Publ. London, 406 p
- Zekollari H., Huss M., Farinotti D., 2019.- "Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble", *The Cryosphere*, 13: 1125-1146, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>

RÉSUMÉS

À 1664 m d'altitude, le col du Noyer, dans le massif français du Dévoluy, accessible en été par une route, fait partie des cols alpins très fréquentés. Il était disposé en secteur non englacé lors de la dernière glaciation quaternaire et il a subi les effets de l'action du gel intense. Des formes de sols polygonaux ont été récemment découvertes. Notre étude présente les résultats d'identification et de caractérisation de ces formes ainsi que des cortèges floristiques qui les occupent actuellement. Les analyses, menées par une équipe pluridisciplinaire, consistent en travaux de repérage par photointerprétation, en études géomorphologiques, sédimentologiques et pédoanthracologiques. Elles confirment la présence de ces sols polygonaux hérités. Des relevés floristiques révèlent que ces formes périglaciaires héritées constituent des habitats originaux, favorisant une forte hétérogénéité locale. L'ensemble constitue un complexe naturel nécessitant une mise en protection. La valorisation patrimoniale de ce site constituerait un moyen de protéger ce complexe constitué d'un paysage géomorphologique rare dans les Alpes, pédagogique sur le plan de sa lisibilité et de son interprétation paléoenvironnementale.

At an altitude of 1664 m, the Col du Noyer in the French Dévoluy Mountains, which is accessible in summer by road, is one of the most popular Alpine passes. It was located in an unglaciated area during the last Quaternary ice age and suffered the effects of the severe frost. Polygonal grounds formations have recently been discovered. Our study presents the results of the identification and characterisation of these formations as well as the floristic assemblages that currently occupy them. The analyses, carried out by a multidisciplinary team, consist of photo-interpretation, geomorphological, sedimentological and pedoanthracological studies. They confirm the presence of these inherited polygonal grounds. Floristic surveys reveal that these inherited periglacial formations constitute original habitats, favouring a strong local heterogeneity. The whole constitutes a natural complex requiring protection. Enhancing the heritage value of this site would constitute a means of protecting this complex, which is a rare geomorphological landscape in the Alps: educational both in terms of its understanding and its paleoenvironmental interpretation.

INDEX

Mots-clés : Sols polygonaux, évaluation géoécologique, protection de la nature, valorisation patrimoniale

Keywords : Polygonal grounds; geoecological assessment; nature protection; heritage enhancement

AUTEURS

PIERRE PECH

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR LADYSS, 191 rue Saint-Jacques 75005 Paris.
pech@univ-paris1.fr

MAHÉ AJINCA

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR LADYSS, 191 rue Saint-Jacques 75005 Paris

SYLVAIN ABDULHAK

CBNA, Conservatoire Botanique National Alpin, Domaine de Charance, 05000 Gap

ERIC HUSTACHE

SMIGIBA, La Tour des Combes – Chemin de la plaine 05140 Aspremont

LAURENT SIMON

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR LADYSS, 191 rue Saint-Jacques 75005 Paris

BRIGITTE TALON

IMBE, Aix-Marseille Univ, Avignon Université, IRD, Aix-en-Provence – Campus Etoile Faculté des Sciences St-Jérôme Case, 421 Av Escadrille Normandie Niemen 13397 Marseille cedex