



HAL
open science

Histoire du développement des activités agro-pastorales depuis 5500 ans sur le territoire du Haut-Giffre Auteurs

Charline Giguet-Covex, Andréa Julien, Erwan Messenger, Katharina Dulias, Quentin Pourrier, David Etienne, Patricia Chiquet, Kevin James-Walsh, Christophe Guffond, Alain Mélo

► To cite this version:

Charline Giguet-Covex, Andréa Julien, Erwan Messenger, Katharina Dulias, Quentin Pourrier, et al.. Histoire du développement des activités agro-pastorales depuis 5500 ans sur le territoire du Haut-Giffre Auteurs. Alain Mélo, Christophe Guffond et Denis Laissus. Acte du PCR "archéologie/environnement en Haute-Savoie à travers les exemples du Salève, de Glières et de Sales, pour les périodes historiques", Presse Universitaire de Grenoble, collection "La Pierre et l'Écrit", A paraître. hal-04304786

HAL Id: hal-04304786

<https://hal.science/hal-04304786v1>

Submitted on 24 Nov 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.

Histoire du développement des activités agro-pastorales depuis 5500 ans sur le territoire du Haut-Giffre

Auteurs

Charline Giguët-Covex, Andréa Julien, Erwan Messenger, Katharina Dulias, Quentin Pourrier, David Etienne, Patricia Chiquet, Kevin James-Walsh, Christophe Guffond, Alain Mélo

Résumé

Les paysages de montagne aujourd'hui sont le fruit d'une longue histoire d'interactions entre l'homme, le climat et le milieu. Quelle est le déroulé de cette histoire dans le vallon de Sales et plus largement à l'échelle du Haut Giffre ? Pour répondre de manière la plus exhaustive possible à cette question, nous avons développé une approche interdisciplinaire croisant données paléoenvironnementales provenant de l'étude de sédiments lacustres, données archéologiques et données historiques. La trajectoire à long terme de l'agroécosystème développé sur cet espace est en accord avec celle documentée à l'échelle des Alpes du Nord-Ouest. L'analyse plus détaillée, notamment du Moyen Âge jusqu'à aujourd'hui, considérant 1) les variations à plus haute résolution temporelle et spatiale, 2) la nature précise des activités (intégrant des données de pollen, d'ADN sédimentaire lacustre, d'archéozoologie et d'archéologie) et 3) la structure et l'organisation du bâti (archéologie et documents historiques), suggère aussi l'existence d'une diversité de trajectoires des agroécosystèmes de montagne. Cette diversité de trajectoires est probablement le fruit d'une complexité des interactions entre climat, environnement, dynamique des populations humaines, et contingences socio-économiques.

Introduction

De nombreuses études menées à l'échelle de l'Arc Alpin et dans diverses disciplines, telles que l'archéologie, la palynologie et plus généralement à partir de l'analyse des archives naturelles, ont démontré la présence de l'homme jusqu'aux plus hautes altitudes et ce depuis plusieurs millénaires^{1,2}. Des activités de chasse et de cueillette se sont d'abord développées puis progressivement avec le Néolithique et les âges des métaux, des activités agro-sylvo-pastorales puis minières se sont mises en

¹ Kevin Walsh et Charline Giguët-Covex, « A History of Human Exploitation of Alpine Regions », in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (Elsevier, 2019), <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11908-6>.

² Oegg Klaus, Kofler Werner, et Schmidl Alexandra, « JOURNALOF New Aspects to the Diet of the Neolithic BIOLOGICALB Tyrolean Iceman "Ötzi" », s. d.

place^{3,4,5,6,7,8,9}. La diversité biologique le long du gradient d'altitude^{10,11} et la richesse géologique des environnements de montagne expliquent probablement en grande partie l'attrait des hommes pour ce type de territoire qui, sous d'autres aspects, peut apparaître hostile. En effet, la mobilité difficile et la multitude de risques gravitaires causés par la topographie (écroulements, glissement de terrain, coulées de boues, crues torrentielles, et avalanches^{12,13,14,15,16}), ainsi que la rudesse du climat constituent des contraintes auxquelles les sociétés de montagne ont dû s'adapter.

L'étagement altitudinal de la végétation est une caractéristique fondamentale des milieux de montagne. Il est à l'origine d'un mode d'occupation unique à ce type d'espace. En effet, les populations de montagne ont, au fil des millénaires, adapté leurs activités et mobilité en fonction de cet étagement et des saisons. Dans les Alpes du Nord-Ouest, les activités pastorales se sont d'abord significativement développées au cours de l'âge du Bronze jusqu'à la période Romaine, dans la partie supérieure des zones subalpines et alpines¹⁷. Ce n'est que plus tard, à partir du Haut Moyen Âge, que des activités pastorales et/ou de cultures importantes sont enregistrées aux étages montagnard et subalpin inférieur. Les cultures se sont développées dans les zones les plus basses, en raison des conditions climatiques, des sols plus pauvres et des accès généralement difficiles des zones d'altitudes, lesquelles sont

³ Lucia Wick et Willy Tinner, « Vegetation Changes and Timberline Fluctuations in the Central Alps as Indicators of Holocene Climatic Oscillations », *Arctic and Alpine Research* 29, n° 4 (novembre 1997): 445, <https://doi.org/10.2307/1551992>.

⁴ Karin A. Koinig et al., « 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in the sediment of an alpine lake – the role of climate, vegetation, and land-use history », *Journal of Paleolimnology* 30, n° 3 (1 octobre 2003): 307-20, <https://doi.org/10.1023/A:1026080712312>.

⁵ Roland Schmidt et al., « A Multi Proxy Core Study of the Last 7000 Years of Climate and Alpine Land-Use Impacts on an Austrian Mountain Lake (Unterer Landschitzsee, Niedere Tauern) », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 187, n° 1-2 (novembre 2002): 101-20, [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(02\)00511-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00511-4).

⁶ Astrid Roepke et Rüdiger Krause, « High Montane–Subalpine Soils in the Montafon Valley (Austria, Northern Alps) and Their Link to Land-Use, Fire and Settlement History », *Quaternary International* 308-309 (octobre 2013): 178-89, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.01.022>.

⁷ B. Vannièrè et al., « Orbital Changes, Variation in Solar Activity and Increased Anthropogenic Activities: Controls on the Holocene Flood Frequency in the Lake Ledro Area, Northern Italy », *Climate of the Past* 9, n° 3 (31 mai 2013): 1193-1209, <https://doi.org/10.5194/cp-9-1193-2013>.

⁸ Benjamin Dietre et al., « Palaeoecological Evidence for Mesolithic to Medieval Climatic Change and Anthropogenic Impact on the Alpine Flora and Vegetation of the Silvretta Massif (Switzerland/Austria) », *Quaternary International* 353 (décembre 2014): 3-16, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.05.001>.

⁹ Walsh et Giguët-Covex, « A History of Human Exploitation of Alpine Regions ».

¹⁰ David Guillet et al., « Toward a Cultural Ecology of Mountains: The Central Andes and the Himalayas Compared [and Comments and Reply] », *Current Anthropology* 24, n° 5 (1983): 561-74.

¹¹ Mark V Lomolino, « Elevation BlackwellScience,Ltd Gradients of Species-Density: Historical and Prospective Views », *Global Ecology*, 2001, 11.

¹² Bruno Wilhelm et al., « Interpreting Historical, Botanical, and Geological Evidence to Aid Preparations for Future Floods », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6, n° 1 (janvier 2019): e1318, <https://doi.org/10.1002/wat2.1318>.

¹³ B. Wilhelm et al., « Impact of Warmer Climate Periods on Flood Hazard in the European Alps », *Nature Geoscience* 15, n° 2 (février 2022): 118-23, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00878-y>.

¹⁴ Vincent Jomelli et al., « Respective Influence of Geomorphologic and Climate Conditions on Debris-Flow Occurrence in the Northern French Alps », *Landslides* 16, n° 10 (octobre 2019): 1871-83, <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01195-7>.

¹⁵ Florie Giacona et al., « Avalanche Activity and Socio-Environmental Changes Leave Strong Footprints in Forested Landscapes: A Case Study in the Vosges Medium-High Mountain Range », *Annals of Glaciology*, 31 octobre 2018, 1-23, <https://doi.org/10.1017/aog.2018.26>.

¹⁶ Laurent Fouinat et al., « One Thousand Seven Hundred Years of Interaction between Glacial Activity and Flood Frequency in Proglacial Lake Muzelle (Western French Alps) », *Quaternary Research* 87, n° 03 (mai 2017): 407-22, <https://doi.org/10.1017/qua.2017.18>.

¹⁷ Charline Giguët-Covex et al., « Long-Term Trajectories of Mountain Agro-Ecosystems in the North-Western Alps », *Regional Environmental Change* 23, n° 2 (juin 2023): 58, <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02030-5>.

principalement utilisées pour faire pâturer les troupeaux. Les prés de fauche, quant à eux peuvent être répartis entre les parties basses des vallées et les hautes altitudes, parfois même dans des zones restreintes et difficilement accessibles^{18,19}. À la belle saison, les hommes et les animaux suivent la pousse de l'herbe conduisant à un ou parfois plusieurs cycles de montée en altitude puis descente en direction de la vallée, avec des étapes dans des habitats temporaires répartis dans les différents étages de végétation²⁰.

Dans ce modèle très général d'usage des territoires de montagnes, différentes organisations et modalités de l'exploitation du milieu peuvent être identifiées, notamment en fonction du contexte environnemental, socio-économique et culturel. Par exemple dans les Alpes du Nord, deux grands systèmes d'exploitation ont été décrit au début du XX^e siècle, le système de *Petite Montagne* et celui de *Grande Montagne*²¹. Dans le cas de la Petite Montagne, des familles ayant un cheptel modeste (par exemple quatre à cinq vaches, quelques moutons et un ou deux porcs), se déplaçaient avec leurs animaux dans des cabanes et pâturages à différentes altitudes au cours de l'été pour produire du fromage et du beurre (généralement les femmes et les enfants). Une partie de chacune de ces familles (les hommes) restait dans la vallée pour s'occuper des cultures et de la fenaison pour l'hivernage. Dans le cas de la Grande Montagne, on retrouve deux sous-catégories. L'une correspondant au regroupement de familles en collectifs qui confient à un berger les animaux de la collectivité pour l'estive et l'autre correspondant à de riches paysans possédant une *Grande Montagne* louée à un *Montagnard*. Celui-ci est chargé de garder les animaux de la vallée (y compris ceux du propriétaire), et parfois des animaux venant de contrées plus lointaines²³. Cette stratégie permet aux familles ou aux paysans de se consacrer aux cultures et à la fenaison. Pour les familles, elle implique la mise en commun du lait pour la fabrication notamment de grands fromages à pâte dure qui se conservent longtemps et qui sont, à la fin de l'été, équitablement répartis en fonction du lait produit par les animaux de chaque propriétaire. Cette organisation permet de vendre les excédents de production de fromage et de bétail (par exemple, les génisses et les veaux) sur les marchés d'automne et d'acheter des céréales qui étaient produites en quantité insuffisante. Il s'agit donc d'une activité plutôt vivrière et d'une économie de subsistance, tout comme dans le cas de la Petite Montagne. À l'inverse, le cas du riche paysan correspond à un système dont la finalité commerciale apparaît évidente. En effet, cette organisation, attestée dès le XVI^e siècle, conduisait à des troupeaux conséquents permettant une production importante de grands fromages à pâte dure destinés à la vente²².

Le paysage du vallon de Sales présente, encore aujourd'hui, une multitude de chalets d'alpage et de ruines d'anciens chalets accolés les uns aux autres que l'on peut associer à la présence d'un village saisonnier. Cette modalité d'occupation et d'usage de l'espace n'est pas observée sur tous les alpages

¹⁸ Jean Robert, « Le fenil dans les Alpes françaises du Nord », *Annales de Géographie* 51, n° 286 (1942): 100-111, <https://doi.org/10.3406/geo.1942.11916>.

¹⁹ Jacky Girel et al., *Histoire de l'agriculture en Oisans (Haute Romanche et pays faranchin Villar d'Arène, Hautes-Alpes)*, Les Cahiers Illustrés du Lautaret 1 (Station Alpine Joseph Fourier (Université Grenoble-Alpes), 2010).

²⁰ Jean-Marcel Dorioz, « Alpagnes, prairies et pâturages d'altitude : l'exemple du Beaufortain. », *Le Courrier de l'environnement de l'INRA, Paris : Institut national de la recherche agronomique Délégation permanente à l'environnement* 35 (1998): 33-42.

²¹ Philippe Arbos, « La vie pastorale dans les Alpes françaises, d'après M. Ph. Arbos », *Revue de géographie alpine* 10, n° 3 (1922): 459-71, <https://doi.org/10.3406/rga.1922.1733>.

²² Hélène Viallet, « Les alpages et la vie d'une communauté montagnarde : Beaufort du Moyen Âge au XVIII^e siècle / Hélène Viallet ; préf. d'Yves-Marie Bercé » (1993).

du Haut-Giffre. En effet, d'autres alpages tels que ceux adjacents d'Anterne et Gers, ne comporte pas autant de chalets actuels et seulement quelques ruines encore visibles²³. Le paysage de Sales est un héritage du système d'exploitation que l'on qualifierait de « *Petite Montagne* ». Depuis quand ce système existe-t-il ? Et de manière plus générale, quelle est l'histoire du développement des activités agro-pastorales sur ce territoire depuis la vallée jusqu'aux plus hauts pâturages du vallon de Sales ? Et quel a été l'impact de ces activités sur le paysage du point de vue du couvert végétal et de la dynamique de l'érosion ?

Pour aborder ces questions, nous avons appliqué une approche paléoenvironnementale s'appuyant sur l'analyse d'une archive naturelle : les sédiments d'un des Lacs des Laouchets situé dans la partie haute du vallon de Sales, bien au-dessus des chalets. Les carottes de sédiments prélevées ont fait l'objet d'analyses sédimentologiques, géochimiques, palynologiques et de biologie moléculaire (métabarcoding ADN²⁴). Les sédiments lacustres présentent l'intérêt d'enregistrer en continu les changements environnementaux affectant le lac et son bassin versant, les activités humaines développées dans le bassin versant mais aussi des changements plus régionaux via le dépôt de particules voyageant par les airs tel que les grains de pollen ou encore les polluants métalliques. Leur analyse par les diverses méthodes évoquées ci-dessus nous permet de retracer l'évolution du couvert végétal et des activités agro-pastorales à l'échelle locale mais aussi au-delà et la dynamique de l'érosion autour du lac depuis plus de 5000 ans. Nous proposons également un regard croisé avec les approches archéologiques développées dans le vallon de Sales ainsi qu'avec des sources historiques afin de mieux rendre compte de l'occupation humaine, des activités et des pratiques.

Site d'étude

Le vallon de Sales qui fait partie de la commune de Sixt-Fer-à Cheval se situe dans le Haut-Giffre entre 1860 et 2733 m d'altitude, c'est-à-dire intégrant l'étage subalpin supérieur et l'étage alpin à nival. Aujourd'hui, la limite supérieure des arbres se situe juste au-dessous avec des épicéas et celle de la forêt vers 1600 m d'altitude. Le paysage du vallon est composé de prairies, de lapiaz non végétalisés et d'éboulis. Il existe un hameau d'une trentaine de chalets à 1870 m d'altitude²⁵. Le substrat géologique étant karstique, l'approvisionnement en eau est assuré par la présence de sources plus ou moins intermittentes à proximité des cabanes. Deux lacs très petits (Les Laouchets ; < 2 m de profondeur, env. 0,27 ha) constituent également une ressource en eau dans la partie supérieure du pâturage à 2135 m d'altitude. Ils étaient utilisés au XIX^e siècle non seulement par les bergers du vallon de Sales mais aussi

²³ Pierre-Jérôme Rey et al., « De la Préhistoire aux temps modernes dans les Alpes d'Anterne et Pormenaz, une première approche de l'occupation de la moyenne montagne entre les Fiz et les Aiguilles Rouges. Résultats du programme de sondages 2008-2011. », in *Actes de la table ronde de Clermont-Ferrand*, Presses universitaires Blaise Pascal, Terra Mater, 2022, 55-93.

²⁴ Pierre Taberlet et al., « Towards Next-Generation Biodiversity Assessment Using DNA Metabarcoding: NEXT-GENERATION DNA METABARCODING », *Molecular Ecology* 21, n° 8 (avril 2012): 2045-50, <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05470.x>; Pierre Taberlet et al., « Environmental DNA: ENVIRONMENTAL DNA », *Molecular Ecology* 21, n° 8 (avril 2012): 1789-93, <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05542.x>.

²⁵ Christophe Guffond, « Les chalets : adéquation entre l'usage et l'agencement », ce numéro.

par les habitants de la commune de Passy située dans la vallée de l'Arve, pour abreuver leurs animaux qui paissaient sur le lapiaz du Désert de Platé²⁶.

Les Lacs des Laouchets, en plus de constituer une ressource en eau essentielle aux hommes et troupeaux, contiennent chacun une archive unique permettant de raconter l'histoire environnementale, climatique et de l'occupation humaine sur ce territoire. Les deux lacs présentent une surface de taille équivalente. Le lac le plus au sud présente un delta très développé et est moins profond (environ 0,8 m d'eau au plus profond) que celui au nord (2,4 m d'eau). Ces caractéristiques sont dues au fait que le lac le plus au sud est connecté à un plus grand bassin versant. Les deux lacs ont fait l'objet de carottages sédimentaires en juillet 2018. Cependant, à la vue des caractéristiques propres à chaque lac présenté ci-dessus et suggérant un taux de sédimentation plus important dans le lac situé au sud, ce qui est par ailleurs confirmé par la lithologie des sédiments avec la présence de dépôts caractéristiques d'évènement de crues²⁷, seule une des carottes prélevées dans le lac nord, appelé Laouchet Bis (Fig. 1), a fait l'objet de l'étude paléoenvironnementale, afin de pouvoir remonter le plus loin dans le temps.

Sur sa partie sud-est, le bassin versant du Lac est bordé par une rupture géologique, une faille mettant en contact des calcaires blancs à Nummulites et des Flyshs shisto-gréseux. Ces deux formations géologiques constituent le substratum rocheux du bassin versant (Fig. 1). Aujourd'hui, les calcaires sont principalement dépourvus de végétation tandis que les Flyshs sont recouverts par une pelouse.

Matériel et Méthodes

Carottages sédimentaires lacustres

Deux carottes mesurant respectivement 91 et 77 cm ont été prélevées dans le lac des Laouchets Bis, dans la zone la plus profonde (2,4 m) (LAOBIS18-01, N° IGSN [TOAE000000255](https://cybercarotheque.fr/index.php?mission=&date1=&date2=&projet=&carotte=laobis&repository=&recherche=Rechercher) et LAOBIS18-02, N° IGSN [TOAE000000256](https://cybercarotheque.fr/index.php?mission=&date1=&date2=&projet=&carotte=laobis&repository=&recherche=Rechercher) ;

<https://cybercarotheque.fr/index.php?mission=&date1=&date2=&projet=&carotte=laobis&repository=&recherche=Rechercher>). Un carottier gravitaire UWITEC et la technique du martelage ont été utilisées pour prélever les sédiments. Les deux carottes ont été prises à environ 5 m l'une de l'autre.

Sédimentologie, géochimie et datation

Les carottes ont été photographiées et décrites pour établir un log stratigraphique caractérisant les faciès sédimentaires. Elles ont ensuite été analysées au scanner de carotte XRF Avaatech avec une source au Rhodium et un pas de 5 mm (fenêtre d'ouverture à 5x15 mm). Les éléments légers (Si, Al, K, Ti, Ca, P, S) ont été mesurés à 10 kV, 0,1 mA pendant 30 secondes et les éléments lourds (Br, Rb, Pb, Fe, Zr) à 30 kV, 0,075 mA pendant 30 secondes, également. Les descriptions lithologiques et les analyses XRF ont été utilisées pour corréliser les deux carottes de sédiments. Cet exercice permet d'évaluer la similarité du remplissage sédimentaire entre les deux carottes et de déterminer 1) la présence éventuelle de dépôts

²⁶ Christophe Guffond et Alain Mélo, « Une institution collective dans l'histoire : l'alpage de Sales (Sixt-Fer-à-Cheval – Haute-Savoie ; fin XIVe – fin XIXe siècles) », in *Etat et institutions en Savoie - Actes du 46e Congrès des Sociétés Savantes de Savoie tenu à Saint-Jean-de-Maurienne*, Société d'Histoire et d'Archéologie de Maurienne, 2018, 253-66.

²⁷ F. Arnaud et al., « Flood and Earthquake Disturbance of 210Pb Geochronology (Lake Anterne, NW Alps) », *Terra Nova* 14, n° 4 (août 2002): 225-32, <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00413.x>.

très localisés à l'échelle du lac, pouvant être liés à des évènements particuliers et 2) la présence d'éventuel hiatus dans l'une ou l'autre des carottes.

La carotte la plus longue (LAOBIS18-01) a été sélectionnée pour réaliser les analyses ponctuelles, notamment des pertes au feu à 550°C pendant 4h puis à 950°C pendant 2h afin d'estimer, respectivement la quantité de matière organique (%) et celle des carbonates (%)²⁸. La matière restante, appelée résidu, correspond aux matériaux silicatés et peuvent inclure des éléments clastiques et biologiques tels que des diatomées. 17 échantillons ont été analysés en perte au feu.

Six macrorestes de végétaux ont été prélevés pour réaliser des datations ¹⁴C au laboratoire de Poznan (Pologne). Le modèle d'âge, c'est-à-dire la relation entre la profondeur de sédiment et son âge, a été établi à l'aide de l'outil Clam développé sous le logiciel R par M. Blaauw²⁹. Pour la période récente, les pollutions dues aux essences plombées et présentant un pic au moment de la crise du pétrole de 1973-74 et celles depuis les années 1900 dues à la combustion du charbon³⁰, fournissent des calages chronologiques supplémentaires qui ont été intégrés au modèle Clam.

Analyse des pollens et spores de champignons coprophiles

Pour l'analyse sporo-pollinique, le protocole physico-chimique d'extraction des spores et des grains de pollen, défini par Faegri et al.³¹, a été employé. Chaque échantillon de sédiment a été soumis à des attaques chimiques acido-basiques (HCl, HF et KOH) afin d'éliminer l'ensemble de la matrice sédimentaire minérale et organique. Le résidu est ensuite monté entre lame et lamelle et observés en microscopie optique à transmission. Les spores de champignons coprophiles ont été comptées sur les mêmes lames afin de documenter l'intensité de l'activité pastorale³². 20 tranches de sédiments ont été prélevées et sous-échantillonnées pour effectuer les analyses des grains de pollen et spores de champignons coprophiles.

Analyses d'ADN sédimentaire lacustre

Ces mêmes tranches de sédiments ont également été sous-échantillonnées, avec toutes les précautions nécessaires vis-à-vis des contaminations, pour les analyses d'ADN sédimentaire lacustre : utilisation de blouses, masques, gants et charlottes à usage unique, et travail dans une salle dédiée avec des paillasses décontaminées à la javel. Le bord des échantillons en contact avec le tube de carottage et l'air a été supprimé et conservé pour les analyses de pertes au feu. En effet, l'ADN sédimentaire lacustre et ancien est dégradé et donc fragmenté par rapport à l'ADN moderne. La présence de contaminations par de l'ADN moderne mieux conservé constitue un problème notamment lors de l'amplification, c'est-à-dire lors de la réplication des brins d'ADN suivant une loi exponentielle, car ceux-ci sont préférentiellement amplifiés. Afin d'évaluer le degré de contamination potentiel lors des manipulations, des contrôles sont

²⁸ Oliver Heiri, André F Lotter, et Gerry Lemcke, « Loss on Ignition as a Method for Estimating Organic and Carbonate Content in Sediments: Reproducibility and Comparability of Results », *Journal of Paleolimnology* 25 (2001): 101-10.

²⁹ Maarten Blaauw, « Methods and Code for 'Classical' Age-Modelling of Radiocarbon Sequences », *Quaternary Geochronology* 5, n° 5 (octobre 2010): 512-18, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2010.01.002>.

³⁰ F. Arnaud et al., « A 300 Year History of Lead Contamination in Northern French Alps Reconstructed from Distant Lake Sediment Records », *J. Environ. Monit.* 6, n° 5 (2004): 448-56, <https://doi.org/10.1039/B314947A>.

³¹ Knut Faegri et al., *Textbook of pollen analysis.*, John Wiley and Sons, Chichester (NJ): Blackburn Press, 1989).

³² David Etienne et al., « Two Thousand-Year Reconstruction of Livestock Production Intensity in France Using Sediment-Archived Fecal *Bacteroidales* and Source-Specific Mitochondrial Markers », *The Holocene* 25, n° 9 (septembre 2015): 1384-93, <https://doi.org/10.1177/0959683615585836>.

effectués à chaque étape des analyses, c'est-à-dire lors du sous-échantillonnage des carottes, des extractions de l'ADN et des amplifications par PCR (réaction de polymérase en chaîne).

Le protocole d'extraction d'ADN utilisé est celui développé par Taberlet et al.³³ pour cibler l'ADN extracellulaire présent dans les sols et modifié par Giguët-Covex et al.³⁴ pour optimiser le rendement d'extraction dans les sédiments lacustres.

Les extraits d'ADN ont ensuite été amplifiés par PCR (réaction en chaîne par polymérase) à l'aide de deux amorces : une pour les plantes³⁵ et l'autre pour les mammifères en combinaison d'une amorce bloquant l'amplification d'ADN humain dont la présence est toujours très importante malgré les précautions prises relatives aux contaminations³⁶. Le protocole d'amplification est le même que celui utilisé et publié sur les sédiments des lacs voisins, d'Anterne^{37,37} et Gers³⁸. Quatre répliques de PCR ont été réalisées (N.B. contre 8 à Anterne et Gers).

Le traitement bioinformatique permettant d'obtenir une liste de taxon associé à un nombre de séquence d'ADN et le protocole de nettoyage du jeu de données vis-à-vis des identifications (% d'identité par rapport aux séquences dans les bases de données de référence) et contaminations sont les mêmes que ceux effectués par Giguët-Covex et al.³⁹.

Approche interdisciplinaire : apport du croisement avec les données historiques et archéologiques

Les sources historiques sont diverses : écrites, iconographiques, cartographiques et photographiques. Elles fournissent des informations très détaillées sur l'organisation spatiale, l'administration, les relations humaines et les pratiques agro-pastorales^{40,41,42}. Cependant, leur perspective temporelle est limitée et nous devons nous rappeler que ces sources ont souvent été produites avec des objectifs politiques ou économiques spécifiques, nécessitant un regard critique sur les reconstitutions. Dans le vallon de Sales, nous disposons de textes administratifs, d'anciens cadastres (Sarde et français), de photographies anciennes et de textes qui facilitent la compréhension de l'occupation humaine et de l'utilisation du territoire.

Les vestiges archéologiques peuvent apporter des informations sur de plus longues périodes que les archives historiques. Cependant, ils sont souvent limités en montagne, déjà par nature car ils correspondent à des occupations saisonnières de courtes durées, ensuite en raison, parfois, des

³³ Taberlet et al., « Towards Next-Generation Biodiversity Assessment Using DNA Metabarcoding ».

³⁴ Charline Giguët-Covex, Pierre Taberlet, et Francesco Gentile Ficetola, « Extracellular DNA Extraction », 2020, 6, <https://doi.org/dx.doi.org/10.17504/protocols.io.bdws7ee>.

³⁵ P. Taberlet et al., « Power and Limitations of the Chloroplast trnL (UAA) Intron for Plant DNA Barcoding », *Nucleic Acids Research* 35, n° 3 (26 janvier 2007): e14-e14, <https://doi.org/10.1093/nar/gkl938>.

³⁶ Charline Giguët-Covex et al., « Long Livestock Farming History and Human Landscape Shaping Revealed by Lake Sediment DNA », *Nature Communications* 5, n° 1 (décembre 2014), <https://doi.org/10.1038/ncomms4211>.

³⁷ Johan Pansu et al., « Reconstructing Long-Term Human Impacts on Plant Communities: An Ecological Approach Based on Lake Sediment DNA », *Molecular Ecology* 24, n° 7 (avril 2015): 1485-98, <https://doi.org/10.1111/mec.13136>.

³⁸ Manon Bajard et al., « Pastoralism Increased Vulnerability of a Subalpine Catchment to Flood Hazard through Changing Soil Properties », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 538 (janvier 2020): 109462, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109462>.

³⁹ C. Giguët-Covex et al., « New Insights on Lake Sediment DNA from the Catchment: Importance of Taphonomic and Analytical Issues on the Record Quality », *Scientific Reports* 9, n° 1 (décembre 2019): 14676, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50339-1>.

⁴⁰ Fabrice Mouthon, « Moines et paysans sur les alpages de Savoie (XIe-XIIIe siècles) : mythe et réalité », *Cahiers d'histoire*, 2001, 13.

⁴¹ D.S. Crook et al., « Human Impact on the Environment in the Annecy Petit Lac Catchment, Haute-Savoie: A Documentary Approach », *Environment and History* 10, n° 3 (1 août 2004): 247-84, <https://doi.org/10.3197/0967340041794312>.

⁴² Nicolas Carrier, « Les moines et la montagne en Savoie du Nord (XIe-XVe siècle) », *Actes de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public* 34, n° 1 (2003): 221-39, <https://doi.org/10.3406/shmes.2003.1856>.

mauvaises conditions de conservation liées au substratum géologique et aux processus gravitaires. Les découvertes archéologiques découlent aussi de la nature des fréquentations de ces espaces. Par exemple, un berger très mobile vivant dans un abri éphémère comme aujourd'hui une tente, laissera moins de traces qu'un berger se déplaçant seulement sur quelques alpages et vivant dans une cabane⁴³. Les vestiges du Vallon de Sales comprennent essentiellement des structures en pierre, des gravures et des charbons de bois qui ont permis de réaliser des datations radiocarbone⁴⁵. L'étude des anciennes structures humaines en pierre (forme, conception, taille, position dans le paysage) est très instructive en ce qui concerne la fonction de la structure (par exemple, enclos, cabanes, abris, installations pour le transit des animaux, gestion de l'eau, stockage de denrées) et les activités humaines. Le vallon se situant dans un contexte géologique calcaire, c'est-à-dire non acide, des ossements ont également pu être conservés et analysés. D'autres vestiges tels que des outils métalliques, des céramiques et d'autres types d'artefacts ont aussi été retrouvés. Ce matériel fournit des informations supplémentaires sur les activités et les pratiques humaines, le statut social, ainsi que des informations chrono-culturelles. Ces recherches archéologiques ont permis de documenter l'occupation humaine depuis le Moyen Âge tardif jusqu'à aujourd'hui⁴⁴.

L'étude des sédiments lacustres fournit des informations complémentaires dans l'espace et le temps qui présentent l'intérêt de documenter à la fois les activités humaines et les changements de l'environnement physique et du vivant. Les sédiments des Laouchets Bis ont été déposés de manière continue au cours du temps, ce qui permet d'identifier précisément les moments de rupture dans la trajectoire évolutive du socio-écosystème.

Résultats

Sédimentologie, géochimie et datation

La carotte de sédiments peut être découpée en 6 unités sédimentaires, chacune apparaissant relativement homogène : les unités 1, 3 et 5 sont de couleurs brunâtres et enrichies en matières organiques (PAF 550°C entre 30 et 50 %) relativement aux unités 2, 4 et 6, de couleurs grises-brunes (U2 et U4) ou grise (U6) et enrichies en éléments silicatés (résidu de PAF variant de 76 à 92 %) (Fig. 2A). L'unité 6 principalement argilo-silteuse, contient également des graviers. Elle peut être découpée en deux sous-unités : U6b présente une composition riche en élément minéraux silicatés (résidu de PAF de 92 %) et pauvre en matières organique (PAF 550°C à moins de 10%), à l'inverse de U6a qui est enrichie en matière organique (PAF à 550°C à 20 %) et appauvrie en éléments silicaté (résidu de PAF autour de 79 %). Ce découpage en unité est également reflété par l'analyse en composante principale (ACP) des données de scanner de carotte XRF, laquelle apporte des informations complémentaires (Fig. 2B et C). Le premier axe explique 53,5 % de la variance totale et le second, 13,6 %. Les éléments corrélés à l'axe 1 sont des éléments détritiques silicatés. Au sein de ces éléments deux pôles peuvent être distingués. Le premier pôle (P1) présente des valeurs négatives sur l'axe 2 et est caractérisé par les éléments Zr, Rb et

⁴³ Francesco Carrer, « The "invisible" shepherd and the "visible" dairyman: Ethnoarchaeology of alpine pastoral sites in the Val di Fiemme (eastern Italian Alps). », in *Summer Farms: seasonal exploitation of the Uplands from Prehistory to the Present*, Collis J, Pearce M, Nicolis F, 2016, 97-108.

⁴⁴ Guffond, « Les chalets : adéquation entre l'usage et l'agencement ». Cet ouvrage

P. Il contribue principalement à l'unité détritique 6. Le second pôle (P2) est caractérisé par des valeurs positives sur l'axe 2 et comprend les éléments Si, K, Ti, Al et Fe. Il contribue principalement à l'unité détritique 2. L'axe 2 est positivement corrélé au Ca et dans une moindre mesure au Pb. Ces éléments forment un troisième pôle géochimique (P3) contribuant aux unités 1, 2 et 3. Le brome (Br) représente un quatrième pôle géochimique (P4), qui est positivement corrélé à l'axe 2 et négativement à l'axe 1. Ce pôle contribue aux unités 1, 3, 5 et U6a.

La quantité de carbonates est relativement constante et très faible dans toute la carotte (PAF 950°C entre 1,4 et 1,6 %). Si la proportion de matière organique est globalement positivement corrélée au brome mesuré au scanner de carotte XRF ($r^2 = 0,69$), les échantillons représentant l'unité 3 sont enrichis en matière organique tandis que ceux de la base de l'unité 6b sont appauvris par rapport au brome (Fig. 1A). Ce résultat montre des provenances ou des états de dégradation différents de la matière organique dans ces unités par rapport aux autres, comme cela a déjà été observé en termes de provenance dans d'autres contextes⁴⁵.

Les sédiments de la carotte LAObis 18-01 couvrent environ 5500 ans d'histoire selon la relation âge-profondeur modélisée à l'aide de CLAM⁴⁶ et en intégrant 5 des 6 datations radiocarbones et les pollutions récentes au plomb dont la chronologie est bien connue⁴⁷ (Fig. 3). La datation apparaissant comme trop jeune a été rejetée. Le macroreste daté pourrait avoir été déplacé en profondeur lors du carottage, ne respectant ainsi plus l'ordre stratigraphique. Ce modèle propose une ancienne période d'accumulation de plomb anthropique au cours de la fin de l'âge de Fer et la Période Romaine (Fig. 3), ce qui est en accord avec les autres enregistrements situés dans les Alpes du Nord^{48,49,50} et du Sud^{51,52,53}, mais aussi très éloignés dans les glaces du Groenland^{54,55}. Pour la période Médiévale, on constate plus de variabilités temporelles entre les différents enregistrements, en fonction de l'échelle spatiale considérée, locale à hémisphérique. La bonne concordance avec le site le plus proche, Anterne, permet

⁴⁵ Sergio Ribeiro Guevara et al., « Bromine as Indicator of Source of Lacustrine Sedimentary Organic Matter in Paleolimnological Studies », *Quaternary Research* 92, n° 1 (juillet 2019): 257-71, <https://doi.org/10.1017/qua.2018.125>.

⁴⁶ Blaauw, « Methods and Code for 'Classical' Age-Modelling of Radiocarbon Sequences ».

⁴⁷ Arnaud et al., « A 300 Year History of Lead Contamination in Northern French Alps Reconstructed from Distant Lake Sediment Records ».

⁴⁸ Charline Giguët-Covex et al., « Frequency and Intensity of High-Altitude Floods over the Last 3.5 Ka in Northwestern French Alps (Lake Anterne) », *Quaternary Research* 77, n° 01 (janvier 2012): 12-22, <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.11.003>.

⁴⁹ Françoise Elbaz-Poulichet et al., « A 10,000-Year Record of Trace Metal and Metalloid (Cu, Hg, Sb, Pb) Deposition in a Western Alpine Lake (Lake Robert, France): Deciphering Local and Regional Mining Contamination », *Quaternary Science Reviews* 228 (janvier 2020): 106076, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106076>.

⁵⁰ Florian Thevenon et al., « (Pre-) Historic Changes in Natural and Anthropogenic Heavy Metals Deposition Inferred from Two Contrasting Swiss Alpine Lakes », *Quaternary Science Reviews* 30, n° 1-2 (janvier 2011): 224-33, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.10.013>.

⁵¹ Giguët-Covex et al., « New Insights on Lake Sediment DNA from the Catchment ».

⁵² Vanessa Py et al., « Interdisciplinary Characterisation and Environmental Imprints of Mining and Forestry in the Upper Durance Valley (France) during the Holocene », *Quaternary International* 353 (décembre 2014): 74-97, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.05.002>.

⁵³ Lisa Shindo et al., « New Insights on the Chronology of Medieval Mining Activity in the Small Polymetallic District of Faravel (Massif Des Écrins, Southern French Alps) Derived from Dendrochronological and Archaeological Approaches », *Journal of Archaeological Science: Reports* 23 (février 2019): 451-63, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.11.008>.

⁵⁴ Kevin J. R. Rosman et al., « Lead from Carthaginian and Roman Spanish Mines Isotopically Identified in Greenland Ice Dated from 600 B.C. to 300 A.D. », *Environmental Science & Technology* 31, n° 12 (1 décembre 1997): 3413-16, <https://doi.org/10.1021/es970038k>.

⁵⁵ Joseph R. McConnell et al., « Lead Pollution Recorded in Greenland Ice Indicates European Emissions Tracked Plagues, Wars, and Imperial Expansion during Antiquity », *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, n° 22 (29 mai 2018): 5726-31, <https://doi.org/10.1073/pnas.1721818115>.

d'affirmer la robustesse du modèle d'âge. La variabilité avec les autres sites alpins plus éloignés (de 77 km à 137 km) et le Groenland, traduit probablement des enregistrements d'activités minières locales, avec des mines qui ne sont pas exploitées aux mêmes moments.

Pollen et spores de champignons coprophiles

Six phases de changements du couvert végétal sont mises en évidence par les analyses polliniques. La première phase, de 3100 à 2250 avant J.C. se caractérise par un couvert arboré important (70% de pollen d'arbres) relativement aux herbacées (30 % de pollen d'herbacées). Les pollens d'arbres se composent surtout, par ordre décroissant, de sapin, pin, noisetier, aulnes et tilleul. Entre 2550 et 1050 avant J.C., une forte décroissance du sapin au profit d'abord de l'épicéa et des aulnes, puis ensuite, du hêtre, est enregistrée. Le tilleul disparaît et le noisetier baisse. Le pin, quant à lui, se maintient. À partir de 2050 av. J.C., les premières spores de *Sporormiella* sont détectées mais en faible quantité. Mille ans plus tard, le couvert forestier diminue fortement ; situation qui perdure jusqu'à 50-100 après J.C. Cette baisse affecte les pins puis surtout les aulnes et profite aux herbacées (surtout poacées, Cichorioideae, renoncules et plantain puis à la fin de la période, cypéracées, apiacées et armoises). Les spores de *Sporormiella* augmentent. Le déclin de la forêt s'accélère à partir de 550 ans avant J.C. et correspond à un pic de spores de *Sporormiella*.

Entre 50-100 et 1000 après J.C., les taxons forestiers reprennent, ce qui est principalement visible sur les aulnes et dans une moindre mesure, le hêtre. Dans un deuxième temps, cette reprise touche également légèrement le sapin, l'épicéa et le pin. Le noyer et le châtaignier apparaissent très discrètement. De 1000 à 1800 après J.C., une nouvelle phase de déforestation (baisse d'environ 20% des pollens d'arbre) affecte surtout l'aulne et l'épicéa, mais aussi le sapin. Les poacées augmentent fortement avec les spores de *Sporormiella* et dans une moindre mesure, les apiacées, astéracées, renoncules ainsi que des plantains. Depuis 1800 après J.C., le signal pollinique montre une reforestation très marquée de l'épicéa, des aulnes et des pins ainsi que du châtaignier.

ADN sédimentaire lacustre

Très peu de taxons ont été détectés par les analyses ADN (8 à 18 taxons). Ils se composent de quelques ligneux (des saules probablement rampants selon les quelques relevés floristiques réalisés dans le bassin versant, des aulnes (probablement *Alnus viridis*⁵⁶) et des maleae (probablement des sorbiers) et d'herbacées principalement représentées par des astéracées, lotiers, anthyllides, campanules, anémones, pâturins, épilobes, potentilles et valérianes. En comparaison des analyses polliniques, on note assez peu de recouvrements taxonomiques et de concordances temporelles dans leurs évolutions. On retrouve dans les deux jeux de données les aulnes pour les arbres et les astéracées et poacées (principalement assignées aux pâturins dans les données ADN) pour les herbes. Cependant, on note des

⁵⁶ Fernand David, « Expansion of Green Alder (*Alnus Alnobetula* [Ehrh] K. Koch) in the Northern French Alps: A Palaeoecological Point of View », *Comptes Rendus Biologies* 333, n° 5 (mai 2010): 424-28, <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.01.002>.

changements de composition floristique dans les données ADN qui correspondent également à des transitions enregistrées par les pollens.

En effet, on observe un premier changement de composition végétale vers 2250 ans avant J.C. Il affecte les rosoideae et maleae qui commencent à être bien détectées à partir de ce moment. Un deuxième changement est enregistré à partir de 550 ans avant J.C. Chez les herbacées, ce changement se marque par l'augmentation des campanules alors que les anémones et épilobes ont tendance à diminuer à partir de ce moment jusqu'à aujourd'hui. On observe également une tendance à l'augmentation du nombre de taxons total détectés depuis cette période, jusqu'à la fin du XIX^e/début du XX^e siècle. En ce qui concerne les arbustes (*Alnus sp.*, maleae et rosoideae), un pic jusqu'en l'an 50-100 ap. J.C., est enregistré. Ces espèces ligneuses, en particulier l'aulne, diminuent ensuite, au contraire des saules qui augmentent fortement selon le nombre de copie d'ADN détectés dans les répliqués d'analyse. À partir de l'an 50-100 ap. J.C, on observe également des détections plus élevées d'une partie des herbacées composées de pâturins et lotiers et/ou anthyllides. Les potentilles ont quant à elles tendance à diminuer.

Interprétations

Les données pollen et ADN sédimentaire lacustre

On constate un faible recouvrement taxonomique entre les différents marqueurs de couvert végétal. L'évolution temporelle de ces quelques taxons est de plus très différentes (Fig. 6). Au vu de nos connaissances sur les processus taphonomiques affectant chacun de ces marqueurs^{57,58,59,60} ces différences peuvent être interprétées comme reflétant une origine très locale, essentiellement le pourtour du lac, des plantes enregistrées par les analyses ADN, en opposition à un enregistrement d'origine à la fois locale et plus régionale fourni par les analyses palynologiques. De plus, le mode de transfert de l'ADN, principalement via l'érosion des sols, rend ce marqueur et donc le signal fourni, dépendant des zones affectées par l'érosion et des communautés végétales qui s'y trouvent^{61,61}. Cette dépendance entre l'ADN et l'érosion, liée à la capacité d'adsorption (et de préservation associée) de l'ADN extracellulaire par les particules minérales telles que les argiles ou organo-minérales, explique sans doute le faible nombre de taxons détectés⁶¹. En effet, le bassin versant du lac des Laouchets bis est très peu favorable à l'érosion en raison des faibles pentes.

⁵⁷ Laura Parducci et al., « Ancient Plant DNA in Lake Sediments », *New Phytologist* 214, n° 3 (mai 2017): 924-42, <https://doi.org/10.1111/nph.14470>.

⁵⁸ Inger Greve Alsos et al., « Plant DNA Metabarcoding of Lake Sediments: How Does It Represent the Contemporary Vegetation », éd. par Christopher Carcaillet, *PLOS ONE* 13, n° 4 (17 avril 2018): e0195403, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195403>.

⁵⁹ Charline Giguët-Covex et al., « The source and fate of lake sedimentary DNA », in *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*, Springer, vol. 6, Sedimentary DNA, 2023.

⁶⁰ Giguët-Covex et al., « New Insights on Lake Sediment DNA from the Catchment ».

⁶¹ Marina A. Morlock et al., « Erosion Regime Controls Sediment Environmental DNA -based Community Reconstruction », *Environmental DNA*, 6 août 2023, edn3.458, <https://doi.org/10.1002/edn3.458>.

L'intégration des deux types de données, ADN et pollen, peut alors être utilisée pour mieux comprendre la dynamique de la végétation dans l'espace (notamment en fonction de l'altitude) et l'occupation des territoires de montagne par les populations de la haute vallée du Giffre.

Histoire des activités humaines et des paysages : intégration des approches paléoenvironnementales, archéologiques et historiques

De l'âge du Bronze à l'époque Romaine

Selon les spores de *Sporormiella* et les grains de pollen de plantain, les activités pastorales débutent très probablement il y a environ 4000 ans dans le vallon de Sales (Fig. 6). Elles deviennent significatives à partir de 1200 av. J.C., c'est-à-dire durant la deuxième moitié de l'âge du Bronze. Depuis 4000 ans, on enregistre également une augmentation du taux de sédimentation (Fig. 6). Cette augmentation s'accompagne d'une diminution globale des éléments minéraux terrigènes comme le zirconium, d'une augmentation progressive des apports organiques et de la baisse du rapport K/Ti, suggérant des apports de matériaux très altérés et donc une érosion affectant principalement les horizons de surface des sols (litière et horizons organo-minéraux). L'enregistrement significatif des activités à partir de 1200 av. J.C., est associé à une baisse du couvert forestier affectant les pins. Au cours de la seconde moitié de l'âge du Fer et la période Romaine, entre 450 av. J.C. et environ 50 ap. J.C., les activités pastorales s'intensifient. Cette phase, marquée par une nouvelle augmentation du taux de sédimentation, s'accompagne aussi d'une baisse des apports organiques et d'une augmentation des éléments minéraux lourds (e.g. Zr, Rb), puis du rapport K/Ti à partir de 50 av. J.C. Ces changements reflètent une érosion affectant cette fois-ci des lithosols et/ou des horizons plus profonds des sols, suggérant alors une dégradation importante de la ressource en sol comme cela a déjà été proposé dans le bassin versant voisin à la même période⁶². Cette érosion a pu être favorisée par le piétinement des troupeaux mais aussi par la baisse du couvert forestier qui s'accroît à ce moment et impacte les aulnes. Cet impact apparaît plus tardif sur l'enregistrement ADN par rapport aux pollens. Le décalage, d'environ 300 ans, pourrait s'expliquer par la remobilisation d'ADN plus ancien enfoui dans les sols, bien qu'un effet « mémoire » aussi long n'ait encore jamais été observé dans les sols^{63,64}. Une autre explication possible serait le maintien d'aulnes uniquement dans le bassin versant du lac des Laouchets Bis, générant des apports d'ADN en quantité importante dans le lac. À l'inverse, le pollen reflèterait un paysage plus large dans lequel les aulnes seraient moins développés qu'auparavant, en raison du besoin d'espaces ouverts pour faire paître les troupeaux^{65,66}. Cette baisse des aulnes reflèterait alors une gestion de l'espace pastoral par les populations de montagne.

⁶² Giguet-Covex et al., « Long-Term Trajectories of Mountain Agro-Ecosystems in the North-Western Alps ».

⁶³ N. G. Yoccoz et al., « DNA from Soil Mirrors Plant Taxonomic and Growth Form Diversity: DNA FROM SOIL MIRRORS PLANT DIVERSITY », *Molecular Ecology* 21, n° 15 (août 2012): 3647-55, <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05545.x>.

⁶⁴ Anthony Foucher et al., « Persistence of Environmental DNA in Cultivated Soils: Implication of This Memory Effect for Reconstructing the Dynamics of Land Use and Cover Changes », *Scientific Reports* 10, n° 1 (décembre 2020): 10502, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67452-1>.

⁶⁵ David, « Expansion of Green Alder (*Alnus Alnobetula* [Ehrh] K. Koch) in the Northern French Alps ».

⁶⁶ Fabian Rey et al., « Climatic and Human Impacts on Mountain Vegetation at Lauenensee (Bernese Alps, Switzerland) during the Last 14,000 Years », *The Holocene* 23, n° 10 (octobre 2013): 1415-27, <https://doi.org/10.1177/0959683613489585>.

Le début du Moyen Âge

La reprise des aulnes enregistrée par les pollens autour de 300 ap. J.C., est en accord avec la baisse des activités pastorales mise en évidence par la baisse de la concentration des spores de *Sporormiella* et celle des grains de pollen de plantain^{67,67}. Cependant, on note une très faible quantité d'ADN d'aulne au même moment, ce qui est à nouveau en contradiction avec les analyses palynologiques, peut-être pour des raisons de localisation dans l'espace des aulnes, cette fois-ci au-delà du bassin versant du lac. La faible érosion enregistrée durant cette période, peu favorable au transfert de l'ADN provenant du bassin versant peut également contribuer à la faible détection des aulnes.

Les activités pastorales restent faibles voire inexistantes jusque vers les X^e-XI^e siècles. Toute cette période est aussi marquée par une baisse du taux de sédimentation et des éléments détritiques minéraux (Zr, K, Ti...). Ces résultats mettent en évidence une période de très faible érosion vraisemblablement associée au déclin du pastoralisme. Le rapport entre la PAF à 550° et le brome est plus élevé dans cette période par rapport au reste de la carotte et notamment à la période riche en matière organique précédente, correspondant à l'unité 5 (Fig. 6). Ce résultat suggère une origine de la matière organique différente, possiblement liée à une augmentation de la production aquatique planctonique et/ou au développement des plantes aquatiques. Des analyses complémentaires, telles que des analyses élémentaires de carbone et d'azote ou de pyrolyse Rock Eval, et/ou une étude plus poussée sur le cycle du brome et ses spéciations dans l'environnement permettraient de tester cette hypothèse^{68,69,70}.

Les aulnes reprennent durant cette phase, ce qui n'est pas le cas des épicéas et du sapin dont les proportions de pollen diminuent. Durant cette période des grains de pollen de noyer et châtaignier, sont également identifiés. Ces changements montrent le développement d'activités humaines, notamment agricoles, à plus basse altitude durant cette période et affectant le couvert forestier. Ce résultat est en accord avec d'autres enregistrements, tels que ceux des Glières à 1428 m⁷¹, du Lac de La Thuile à 875 m dans le massif des Bauges⁷² ou d'Aiguebelette à 375 m dans l'avant pays⁷³.

Du Moyen Âge Central à Aujourd'hui

⁶⁷ Wick et Tinner, « Vegetation Changes and Timberline Fluctuations in the Central Alps as Indicators of Holocene Climatic Oscillations ».

⁶⁸ Charline Giguet-Covex et al., « Changes in Erosion Patterns during the Holocene in a Currently Treeless Subalpine Catchment Inferred from Lake Sediment Geochemistry (Lake Anterne, 2063 m a.s.l., NW French Alps): The Role of Climate and Human Activities », *The Holocene* 21, n° 4 (juin 2011): 651-65, <https://doi.org/10.1177/0959683610391320>.

⁶⁹ Manon Bajard et al., « Progressive and Regressive Soil Evolution Phases in the Anthropocene », *CATENA* 150 (mars 2017): 39-52, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.001>.

⁷⁰ Sébastien Bertrand et al., « Bulk Organic Geochemistry of Sediments from Puyehue Lake and Its Watershed (Chile, 40°S): Implications for Paleoenvironmental Reconstructions », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 294, n° 1-2 (août 2010): 56-71, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.03.012>.

⁷¹ Andréa Julien et al., « 7000 ans d'histoire de la végétation et des activités agro-pastorales sur le plateau des Glières (Alpes du Nord Françaises) », ce numéro.

⁷² Giguet-Covex et al., « Long-Term Trajectories of Mountain Agro-Ecosystems in the North-Western Alps ».

⁷³ Erwan Messenger et al., « datasets of "Two millennia of complexity and variability in a peri-alpine socioecological system (Savoie, France): the contribution of palynology and sedaDNA analysis. *Frontiers in Ecology and Evolution*. " », juin 2022, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19780297.v1>.

Deux nouvelles phases d'activités pastorales importantes sont enregistrées entre le XI^e et le XIV^e siècle puis entre le XVII^e et le XX^e siècle (Fig. 6). À partir du XI^e siècle, le taux de sédimentation augmente également et correspond à l'augmentation d'apports détritiques minéraux, cette fois-ci non seulement marqué par le zirconium mais surtout enrichis en éléments légers tels que le titane et le potassium (Fig. 2 ; Fig. 6). Ces résultats montrent une érosion affectant une source différente ou une source additionnelle par rapport à la précédente phase érosive de la fin de l'âge du Fer et de la période Romaine. Cette période est également marquée par une baisse du couvert forestier, en grande partie expliquée par la baisse des aulnes, observée à la fois sur le signal pollinique et sur l'ADN, attestant ainsi d'une dynamique locale. La proportion d'épicéas diminue également probablement en réponse aux développements des activités humaines à plus basse altitude, enregistrées au travers d'une nouvelle augmentation très marquée des cultures d'arbres fruitiers, les châtaigniers et noyers (Fig. 6).

Ces nouvelles phases d'occupation font écho aux résultats des fouilles archéologiques et aux recherches historiques. En effet, les premiers vestiges de bâtiments dont la vocation était vraisemblablement pastorale datent du XI^e siècle⁷⁴. L'occupation de ces bâtiments de taille imposante s'étend jusqu'à la fin du XIV^e-début XV^e siècle. Dans une autre zone de l'alpage, un autre chalet de grande taille a été occupé entre les XV^e et XVII^e siècles. Il fait partie d'un groupe d'une douzaine de chalets de plus petites tailles qui n'ont pas été fouillés ou n'ont livré aucun matériel et qui sont interprétés comme les débuts d'un village. Les documents écrits nous disent que l'alpage accueillait déjà 34 personnes en 1418 et 103 en 1499⁷⁵, révélant la croissance du village. Deux autres chalets ont été fouillés dans un autre secteur. Selon les cadastres sardes et français et une datation radiocarbone, l'un est occupé après 1730 mais avant 1922, tandis que l'autre est postérieur puisque présent sur le cadastre de 1922. Cette phase qui correspond au maximum d'occupation en termes de nombre de chalets ; une quarantaine en 1730, une soixantaine en 1922 et jusqu'à plus d'une centaine dans les décennies qui suivent ; est probablement l'écho du second pic d'activité enregistré au cours du dernier millénaire dans l'archive lacustre (i.e. entre le XVII^e et le XX^e siècle, Fig. 6). Trois des chalets fouillés couvrant de manière discontinue ce dernier millénaire ont livrés des ossements d'animaux à la fois domestiques et sauvages⁷⁶ (Fig. 6). Les données apportées par l'identification des ossements sont parcellaires et difficilement utilisables pour valider des tendances dans l'évolution de la composition des animaux. Néanmoins, il est intéressant de noter 1) une absence de changement significatif dans la proportion de caprins par rapport au bovin contrairement à ce qui a pu être mis en évidence dans les sédiments des lacs voisins, Anterne et Gers, ou même d'autres lacs des Alpes du Nord grâce aux analyses d'ADN de mammifère^{77,78,79}, 2) une plus faible richesse dans la composition des ossements du chalet daté des XV^e-XVII^e siècles, c'est-à-dire lors d'une phase de déclin suggérée par l'analyse des sédiments du lac des Laouchets Bis, 3) la présence des cochons avec les caprins, bovins et équins, ce qui n'a jusqu'alors jamais été détectés par l'approche ADN (ou de manière

⁷⁴ Guffond, « Les chalets : adéquation entre l'usage et l'agencement ». Ce numéro

⁷⁵ Guffond et Mélo, « Une institution collective dans l'histoire : l'alpage de Sales (Sixt-Fer-à-Cheval – Haute-Savoie ; fin XIV^e – fin XIX^e siècles) ».

⁷⁶ Patricia Chiquet et Christophe Guffond, « Une histoire bestiale et médiévale du haut de la montagne. Premiers résultats de l'étude des ossements d'animaux de l'Alpage de Sales (Sixt-Fer-à-Cheval – Haute-Savoie) », Ce numéro.

⁷⁷ Giguet-Covex et al., « Long Livestock Farming History and Human Landscape Shaping Revealed by Lake Sediment DNA ».

⁷⁸ Sandra Garcés-Pastor et al., « High Resolution Ancient Sedimentary DNA Shows That Alpine Plant Biodiversity Is a Result of Human Land Use », preprint (In Review, 22 septembre 2021), <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-908129/v1>.

⁷⁹ Giguet-Covex et al., « Long-Term Trajectories of Mountain Agro-Ecosystems in the North-Western Alps ».

stochastique et/ou associé à des problèmes de contamination) et 4) la présence aussi du chamois permettant de montrer la coexistence d'activités pastorales et de chasse.

Au XX^e siècle, comme un peu partout dans les Alpes, les activités humaines déclinent en montagne^{80,81}. Cette déprise, combinée avec les lois de restauration des terrains de montagne (de la fin du XIX^e mais peu effective avant le milieu du XX^e dans la région) et probablement le réchauffement climatique a permis la mise en place d'une dynamique de reforestation^{82,83,84}, bien enregistrée ici par les pollens de pin, épicéa et aulne. Les apports détritiques et donc l'érosion diminuent en réponse à cette déprise et à un climat moins propice à ce processus (Fig. 6).

Discussion

Le vallon de Sales et le Haut-Giffre : un modèle d'occupation du territoire général à l'ensemble des Alpes du nord-ouest mais des spécificités locales

L'évolution temporelle et altitudinale du développement des activités pastorales et agricoles du Haut-Giffre, retranscrites à travers l'enregistrement paléoenvironnemental du lac des Laouchets Bis, rentre dans un schéma plus global proposé pour les Alpes du nord-ouest au-delà de 850 m d'altitude, c'est-à-dire dans les étages montagnards à alpin/nival⁸⁵. Ce schéma est caractérisé par un développement important des activités pastorales d'abord dans les parties hautes des massifs, au-delà de 2000 m d'altitude, dès le milieu/fin de l'âge du Bronze. Ces activités s'intensifient à la fin de l'âge du Fer et durant la période Romaine, périodes au cours desquelles le paroxysme des activités pastorales dans les alpages d'altitude est atteint. Ce type de schéma d'intensification des activités pastorales semble se développer aussi dans les plaines des zones péri-alpines, comme observé autour des Lacs de Paladru et Moras^{86,87}. À la fin de l'âge du Fer et le début de la période Romaine, ces activités et les pratiques associées ont conduit à une dégradation importante des sols, aussi bien dans des zones de plaine⁸⁸, qu'en altitude⁹⁰. Dans les alpages d'altitude d'Anterne et des Laouchets, le maintien d'une activité pastorale importante est probablement devenu impossible, expliquant au moins en partie, le déclin des activités enregistré.

⁸⁰ B Andres, « Alpine huts, livestock and cheese in the Oberhasli region (Switzerland): Medieval and early modern building remains and their historical context. », in *Summer Farms: seasonal exploitation of the Uplands from Prehistory to the Present*, In: Collis J, Pearce M, Nicolis F, 2016, 155-82.

⁸¹ Carrer, « The "invisible" shepherd and the "visible" dairyman: Ethnoarchaeology of alpine pastoral sites in the Val di Fiemme (eastern Italian Alps). »

⁸² Nicolas Elleaume et al., « Interdisciplinary Insights into a 500-Year Trajectory of an Alpine Socio-Ecological System in Montaimont, France », *Regional Environmental Change* 22, n° 2 (juin 2022): 62, <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01902-6>.

⁸³ Erich Tasser, Georg Leitinger, et Ulrike Tappeiner, « Climate Change versus Land-Use Change—What Affects the Mountain Landscapes More? », *Land Use Policy* 60 (janvier 2017): 60-72, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.019>.

⁸⁴ Giguet-Covex et al., « Long-Term Trajectories of Mountain Agro-Ecosystems in the North-Western Alps ».

⁸⁵ Giguet-Covex et al.

⁸⁶ Élise Doyen et al., « Land-Use Changes and Environmental Dynamics in the Upper Rhone Valley since Neolithic Times Inferred from Sediments in Lac Moras », *The Holocene* 23, n° 7 (juillet 2013): 961-73, <https://doi.org/10.1177/0959683612475142>.

⁸⁷ E. Doyen et al., « Land Use Development and Environmental Responses since the Neolithic around Lake Paladru in the French Pre-Alps », *Journal of Archaeological Science: Reports* 7 (juin 2016): 48-59, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.03.040>.

⁸⁸ Fabien Arnaud et al., « Erosion under Climate and Human Pressures: An Alpine Lake Sediment Perspective », *Quaternary Science Reviews* 152 (novembre 2016): 1-18, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.09.018>.

D'un point de vue archéologique, aucune structures datées de l'âge du Bronze n'ont été découvertes sur les deux alpages. A quelques kilomètres à vol d'oiseau, dans la zone de Pormenaz, seule une structure en bois appartient à cette époque⁸⁹. Les quelques premiers vestiges datés de structures en pierre apparaissent à l'âge du Fer et la période Romaine vers Pormenaz, Ecuelles et Anterne et seulement au Moyen Âge central à Sales. Cette évolution temporelle des structures dénote une évolution des modes de vies et probablement des activités et pratiques pastorales des populations de montagne.

Le développement important des activités pastorales et agricoles apparaît plus tardif dans les zones montagnardes et subalpines inférieures (< à 2000 m). En effet, il débute au Haut Moyen Age, à un moment où les activités sont peu ou pas développées en altitude⁸⁶ (Fig. 6). À partir du Moyen Âge central, tous les étages de végétation sont exploités de manière intensive^{86,87,88}. Ce modèle d'occupation, reflété dans les données du lac des Laouchets Bis, suggère que le mode de vie avec une montée en alpage intégrant des étapes dans les différents étages de végétation s'est fortement développé seulement au cours du dernier millénaire. Au cours de cette période, plusieurs changements ont été enregistrés, notamment dans l'intensité des activités, la composition des troupeaux et dans les modes d'exploitation des territoires du Haut-Giffre. Au sein de ce petit territoire de montagne, nos données suggèrent des différences temporelles, et vraisemblablement d'organisation, entre les alpages voisins de Gers, Anterne et Sales.

Tout d'abord, l'analyse de l'ADN sédimentaire lacustre montre des changements dans la composition des troupeaux autour des XIII^e et XV^e siècle dans les alpages de Gers et Anterne. Nous pouvons remarquer que ce changement apparaît plus tardivement, au XV^e siècle, à Gers⁹⁰. En revanche, les données archéozoologiques du vallon de Sales, bien que fournissant une vision probablement partielle de la réalité, suggèrent plutôt une stabilité dans le rapport caprinés/bovins sur cet alpage. Nous notons cependant une plus grande similitude dans la composition des troupeaux de Sales et Gers par rapport à Anterne, qui se distingue par l'absence de chèvres selon les analyses ADN. L'alpage de Sales se caractérise également par la présence des équins. A l'échelle de l'arc alpin, ce sont surtout des chevaux (*Equus caballus*) qui sont détectés par l'ADN sédimentaire lacustre, et ce depuis 900 ans jusqu'au XIX^e siècle (résultats en cours de publication). Concernant l'évolution de l'intensité des activités pastorales enregistrées dans les sédiments des lacs des Laouchets Bis, celle-ci apparaît plus en phase avec celle de Gers qu'avec Anterne (Fig. 6). En effet, le pic d'activité du XIII^e siècle à Gers et aux Laouchet Bis correspond à un creux à Anterne. A l'inverse, le pic d'activité enregistré entre les XIV^e et XVI^e siècle à Anterne correspond à une phase de déclin dans les enregistrements de Gers et des Laouchets Bis. Cependant, l'existence de ces décalages temporels pourraient aussi être liés aux incertitudes des datations et modèles d'âges ou pour les Laouchets Bis, à la faible résolution temporelle des données.

Les fouilles archéologiques de Sales et les données historiques révèlent une évolution dans le nombre de bâtiments, dans leur forme et taille ainsi que dans leur fonction et organisation. Un de ces changements majeurs s'opère entre les XIV^e et XVI^e siècle, c'est-à-dire au cours de la phase de déclin des activités dans ce vallon selon l'enregistrement du lac des Laouchets Bis. Ce changement se caractérise

⁸⁹ Rey et al., « De la Préhistoire aux temps modernes dans les Alpes d'Anterne et Pormenaz, une première approche de l'occupation de la moyenne montagne entre les Fiz et les Aiguilles Rouges. Résultats du programme de sondages 2008-2011. »

⁹⁰ Giguet-Covex et al., « Long-Term Trajectories of Mountain Agro-Ecosystems in the North-Western Alps ».

vraisemblablement par le développement de plus petits chalets groupés (formant un village) puis progressivement accolés, construits sur le même modèle à partir de la fin du Moyen Âge⁹¹. La naissance de ce village reflète vraisemblablement le développement du système d'exploitation de type « *Petite Montagne* ». L'alpage d'Anterne comporte également des chalets groupés situés autour du refuge Alfred Wills vers 1800 m d'altitude. Cependant, bien que ceux-ci n'aient pas été étudiés lors des campagnes de fouilles archéologiques⁹², leur développement (i.e. nombre de bâtiments et ruines visibles) ne semble pas aussi important que dans le vallon de Sales. La présence de bâtiments dans cette zone est attestée dans les textes au XIV^e siècle, c'est-à-dire lors du pic de forte activité enregistrée dans les sédiments du lac d'Anterne et évoqué précédemment (Fig. 6). Plusieurs bâtiments sont également présents sur la Mappede Sarde de 1730.

Les différences, vraisemblablement temporelles dans l'évolution de l'intensité des activités, de composition des troupeaux et de développement des habitats, entre Sales et Anterne suggèrent l'existence d'une variabilité à l'échelle locale dans les modalités d'exploitation du territoire. Les données recueillies à Anterne, en comparaison de celles de Sales, nous amènent à soulever la question du développement d'un système d'exploitation plutôt du type de la « *Grande Montagne* » à Anterne, ou reposant sur des troupeaux transhumants, en opposition à celui de la « *Petite Montagne* » de Sales, avec des différences de charges pastorales associées très probables (supposées plus importantes à Anterne).

Jusqu'à il y a deux générations, des troupeaux de moutons transhumants de la Crau (sud de la Provence) montaient à Anterne (communication personnelle de la petite-fille du berger de l'époque), alors que dans l'alpage de Sales une exploitation vivrière a été conservé jusque tardivement dans le XX^e siècle. Le système de transhumance, caractérisé par un berger gérant un(des) troupeau(x) « *étranger* » venu(s) pour la ressource en herbe qui se fait rare au cours de l'été en Provence (à l'inverse de l'hiver où elle est limitée en montagne mais importante dans les plaines du sud de la France)^{93,94}, rappelle la dépendance aux ressources naturelles des activités pastorales et agricoles de manière générale et de ce fait l'importance de considérer les effets potentiels des changements climatiques et des conditions environnementales (pouvant être impactées par les activités humaines) sur ces ressources.

La prise en compte des ressources comme potentielles variables explicatives des différences spatiales et temporelles enregistrées

Conditions climatiques et production d'herbe. On observe que la phase de faible intensité des activités enregistrées à Sales et Gers mais pas à Anterne débute au Petit Âge Glaciaire (PAG), c'est-à-dire durant la période (si l'on considère la grande tendance climatique) la plus froide et humide de tout l'Holocène,

⁹¹ Guffond, « Les chalets : adéquation entre l'usage et l'agencement ».

⁹² Rey et al., « De la Préhistoire aux temps modernes dans les Alpes d'Anterne et Pormenaz, une première approche de l'occupation de la moyenne montagne entre les Fiz et les Aiguilles Rouges. Résultats du programme de sondages 2008-2011. »

⁹³ Charles Gardelle, « La transhumance ovine entre les régions méditerranéennes et les Alpes en 1964 », *Revue de géographie alpine* 53, n° 3 (1965): 449-77, <https://doi.org/10.3406/rga.1965.3221>.

⁹⁴ Henri Onde, « La transhumance en Maurienne et en Tarentaise », *Revue de géographie alpine* 20, n° 2 (1932): 237-51, <https://doi.org/10.3406/rga.1932.5307>.

en particulier durant les étés^{95,96,97}. Avec une durée d'enneigement des montagnes plus longue, on peut imaginer une baisse importante de la ressource en herbe disponible pour les troupeaux. Un modèle de type « *Grande Montagne* » gérée par le montagnard⁹⁸ avec des troupeaux provenant de ou étant hébergés l'hiver dans les plaines des zones péri-alpines, ou avec des troupeaux transhumants vers le sud (transhumance inverse⁹⁹), serait moins impacté par cette baisse de la ressource et pourrait alors expliquer le développement des activités à Anterne mais pas à Sales, où au contraire le système développé à ce moment est celui de la « *Petite Montagne* ». Par ailleurs, le milieu du XIV^e siècle correspond au début de la deuxième pandémie de peste en Europe, ce qui pourrait également avoir contribué au déclin des activités à Sales et Gers.

La ressource en eau. Le développement d'un mode d'exploitation de type « *Petite Montagne* » à Sales peut s'expliquer au moins en partie par les difficultés d'approvisionnement en eau. En effet, la ressource en eau est limitée sur cet espace en raison du terrain karstique, ce qui est peu propice à l'accueil de grands troupeaux, à l'inverse de l'alpage d'Anterne, où le lac constitue un réservoir naturel quasi inépuisable pour abreuver les animaux. La situation en milieu karstique constitue une réelle contrainte vis-à-vis de la ressource eau. L'approvisionnement est une préoccupation majeure pour les bergers et familles vivant sur ces espaces. Ceci explique d'ailleurs le creusement d'un bassin monumental dans le calcaire en amont des chalets de Sales en 1869, en complément des sources intermittentes et de l'eau des deux petits lacs très peu étendus et peu profonds des Laouchets. Dans un autre alpage situé également en milieu karstique, celui de Niffion d'en bas à 1604 m d'altitude dans le Chablais, les familles vivant dans le petit hameau au début du XX^e siècle récupéraient l'eau de pluie s'écoulant sur les toits dans des tonneaux et lors d'étés secs, ils allaient récupérer de la neige dans les crevasses du karst¹⁰⁰.

La terre nourricière. Le sol est lui aussi une ressource indispensable. Il constitue le support pour la production de l'herbe. La photo du bassin versant actuel du Lac des Laouchet Bis montre une absence de sol sur la partie amont et calcaire du bassin versant (Fig. 1). Ce paysage n'est très probablement pas naturel et constitue peut-être un héritage des phases de fortes dégradations des sols enregistrée au cours de la Période Romaine puis du Moyen Âge. Il soulève la question de la capacité de régénération de ces sols et/ou de leur forte sensibilité à l'érosion et des besoins d'adaptation des modes d'exploitation de ces milieux dans une perspective de développement durable des activités.

Conclusion

⁹⁵ Ulf Büntgen et al., « Summer Temperature Variations in the European Alps, a.d. 755–2004 », *Journal of Climate* 19, n° 21 (2006): 5606-23, <https://doi.org/10.1175/JCLI3917.1>.

⁹⁶ Oliver Heiri et al., « Stacking of Discontinuous Regional Palaeoclimate Records: Chironomid-Based Summer Temperatures from the Alpine Region », *The Holocene* 25, n° 1 (janvier 2015): 137-49, <https://doi.org/10.1177/0959683614556382>.

⁹⁷ Melaine Le Roy et al., « Calendar-Dated Glacier Variations in the Western European Alps during the Neoglacial: The Mer de Glace Record, Mont Blanc Massif », *Quaternary Science Reviews* 108 (janvier 2015): 1-22, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.033>.

⁹⁸ Viallet, « Les alpages et la vie d'une communauté montagnarde : Beaufort du Moyen Âge au XVIII^e siècle / Hélène Viallet ; préf. d'Yves-Marie Bercé ».

⁹⁹ Charles Gardelle, « La transhumance inverse des bovins vers les régions méditerranéennes », *Revue de géographie alpine* 53, n° 3 (1965): 503-4, <https://doi.org/10.3406/rga.1965.3227>.

¹⁰⁰ Joseph Ticon, *Images du Chablais: photographie de Léon Quiblier, 1900-1920*, Le Vieil Annecy, 2009.

L'histoire du développement de l'agro-écosystème du vallon de Sales et plus largement du Haut Giffre, décrite à partir de l'étude des archives environnementales et humaines est en accord, dans sa grande tendance, avec celle documentée à l'échelle des Alpes du Nord-Ouest. L'analyse plus détaillée, considérant 1) les variations à plus haute résolution temporelle et spatiale, 2) la nature précise des activités (intégrant les données de pollen et microfossiles non-polliniques, d'ADN sédimentaire lacustre, d'archéozoologie et d'archéologie) et 3) la structure et l'organisation du bâti (archéologie et documents historiques), suggère aussi l'existence d'une diversité de trajectoires spatio-temporelles des agro-écosystèmes de montagne, notamment en termes d'intensité d'activités et de modes d'exploitation pastorales. Cependant, cette analyse permet surtout de poser des hypothèses en raison des incertitudes liées à la nature partielle des données dont nous disposons : analyse paléoenvironnementale discontinue et à basse résolution, analyses d'ADN sédimentaire lacustre limitées par des problèmes taphonomiques, présence de vestiges limités, fouilles archéologiques non-exhaustives, incertitudes de datations.

Au-delà de ces limites, l'approche interdisciplinaire développée ici permet non-seulement de poser de nouvelles questions ou hypothèses de travail, mais aussi d'apporter une multitude d'information complémentaires permettant de mieux comprendre les interactions complexes, car multidimensionnelles, entre l'homme, le climat et son environnement.



Figure 1. Présentation des lacs des Laouchets et du bassin versant du Laouchet Bis étudié ici et situé dans le vallon de Sales (commune de Sixt-Fer-à-Cheval). La photo permet de mettre en évidence le substrat géologique et la couverture végétale.

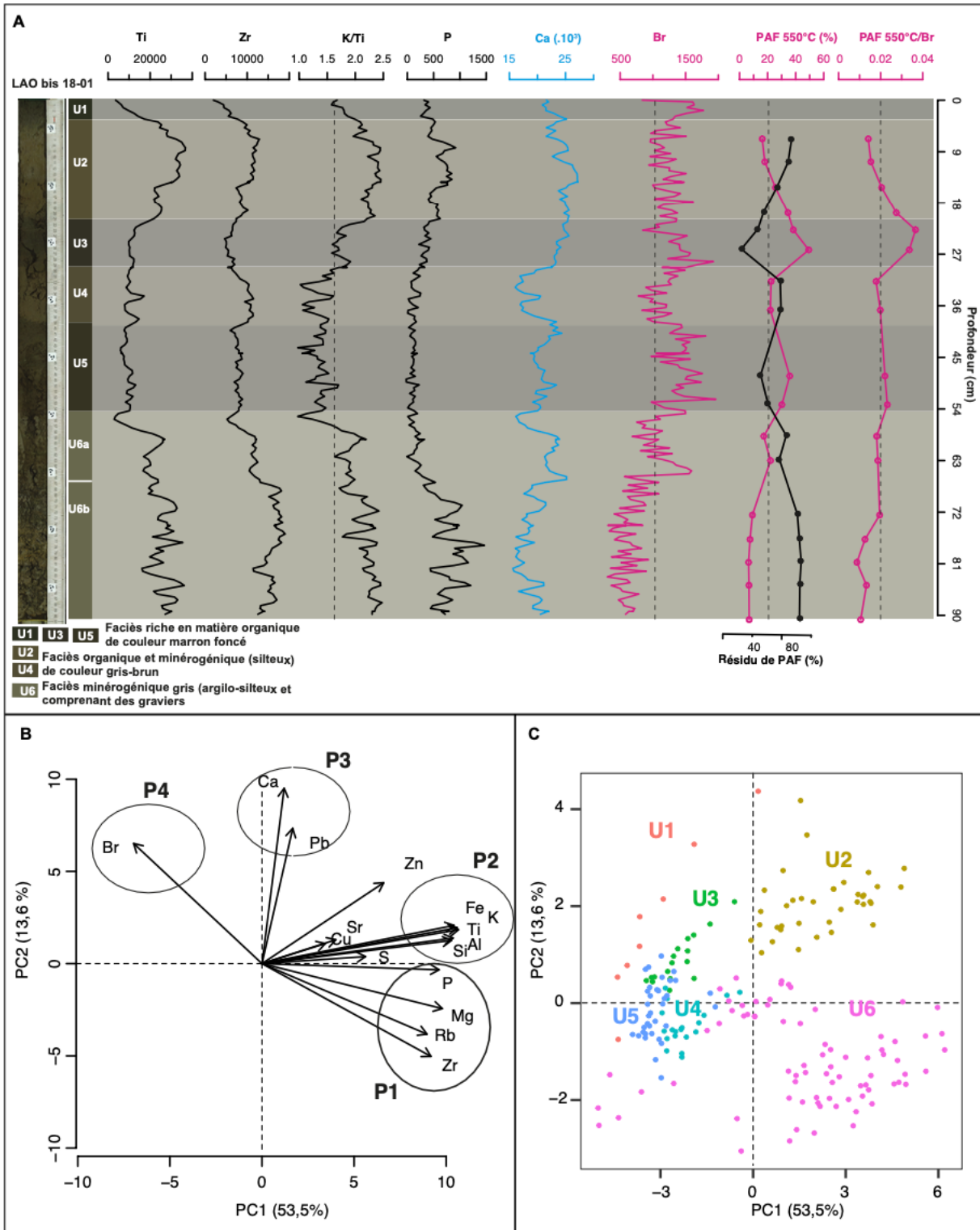


Figure 2. Sédimentologie et géochimie. A) Photographie de la carotte de sédiments, description lithologique et composition géochimique en fonction de la profondeur. Analyse en composante principale (ACP) des données géochimiques (scanner de carotte XRF) : B) vecteurs propres (i.e. projection des éléments dans un repère en 2 dimensions représentant la variabilité principale des données) et C) valeurs propres (i.e. projection de la position de chaque profondeur analysée dans ce même repère simplifié des données).

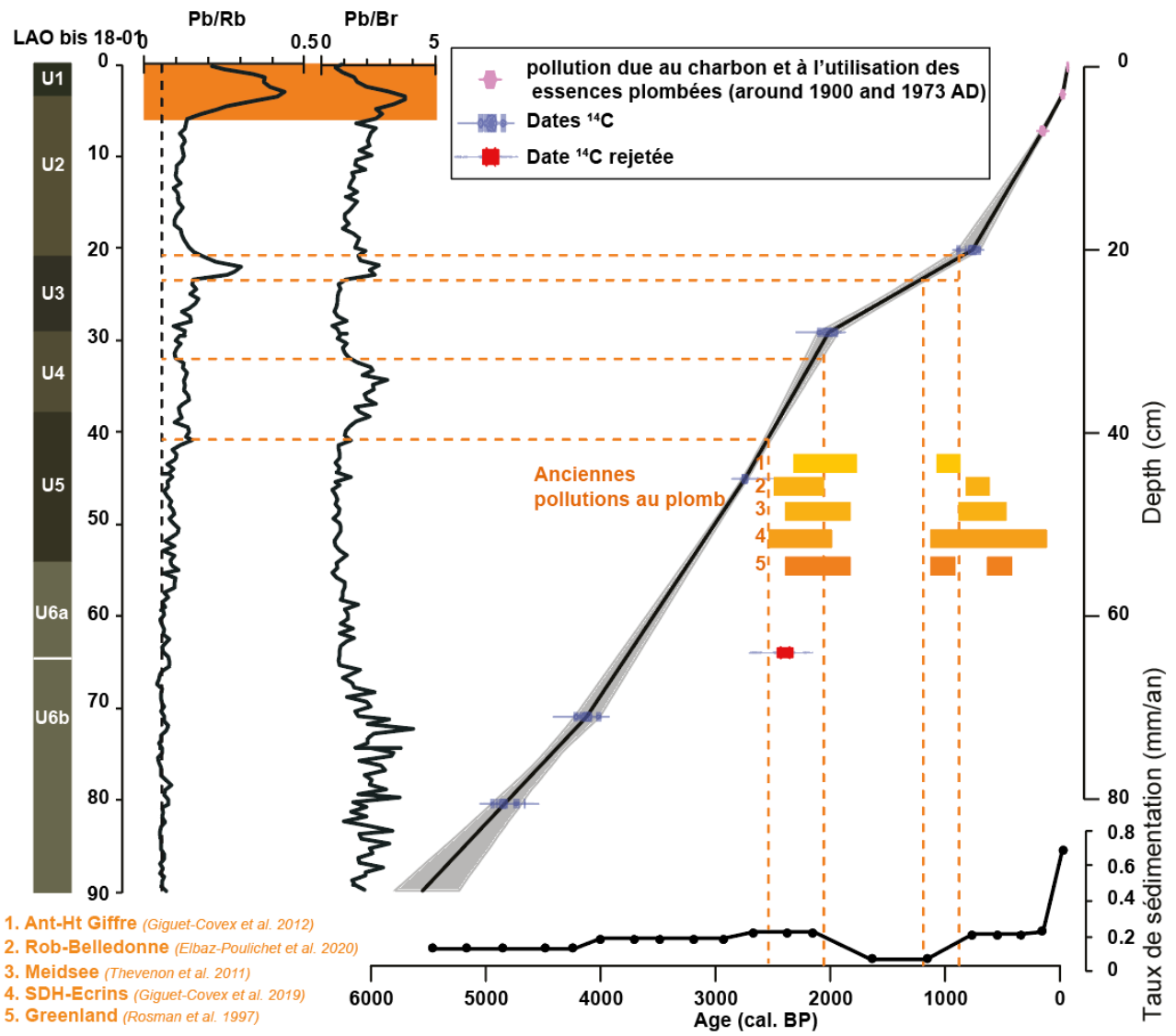


Figure 3. Modèle d'âge de la carotte prélevée dans le Lac des Laouchets Bis (LAOBIS18-01).

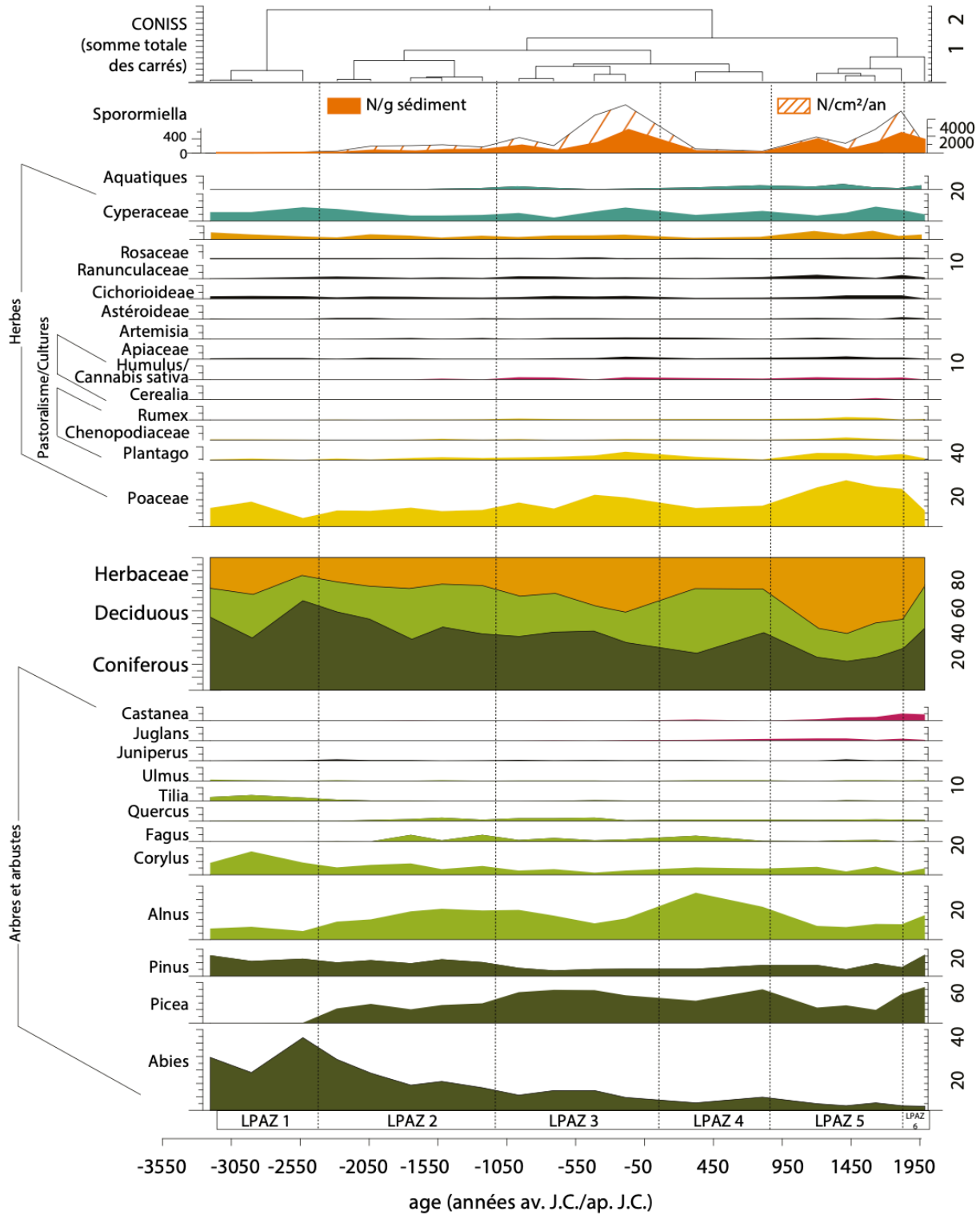


Figure 4. Évolution du couvert végétal et des activités agro-pastorales vu par la composition des grains de pollen (diagramme simplifié et donc non-exhaustif) et les spores de *Sporormiella*.

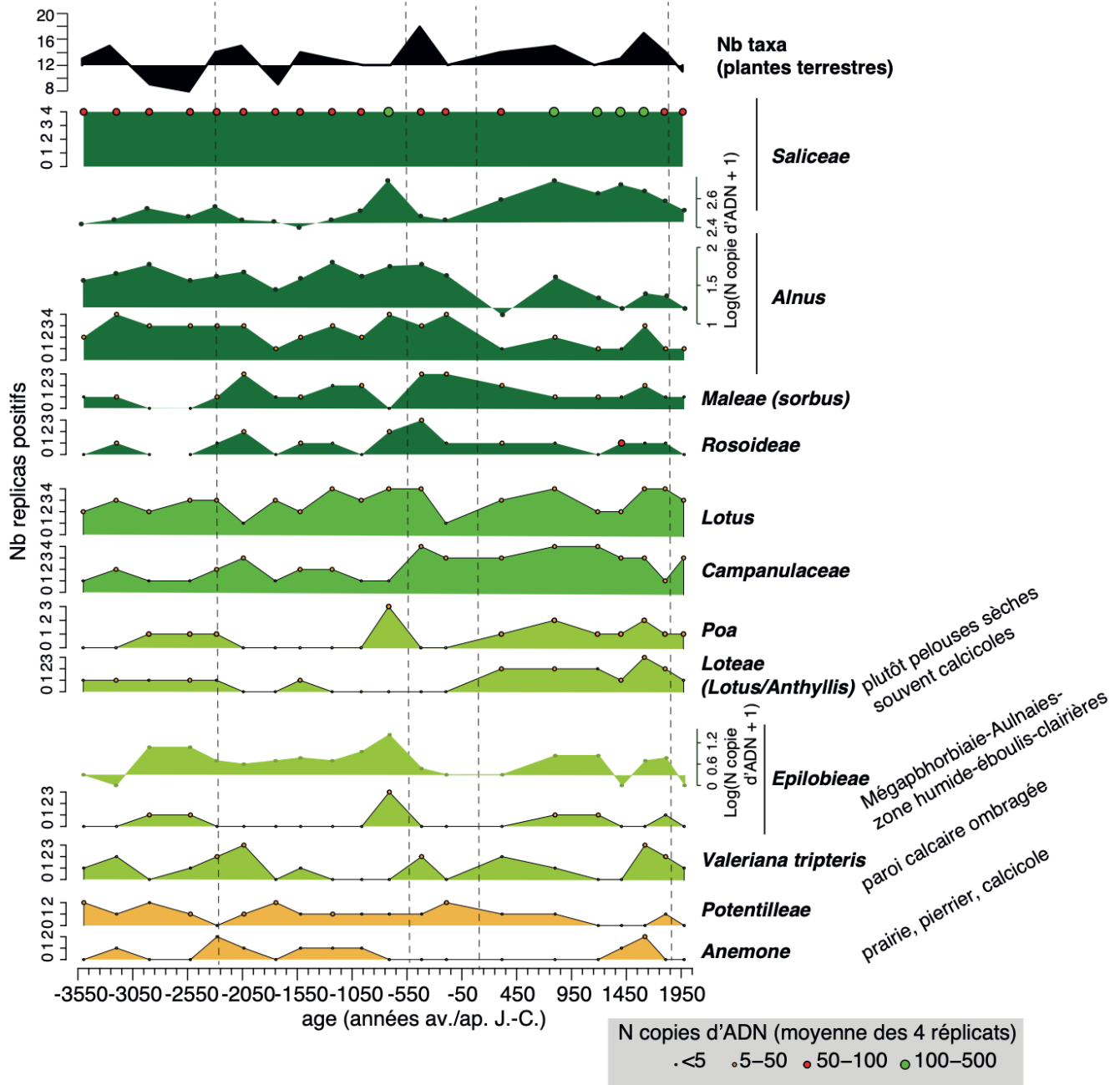


Figure 5. Évolution du couvert végétal vu par les analyses d'ADN sédimentaire lacustre, c'est-à-dire à l'échelle locale : le bassin versant du Lac des Laouchets Bis. L'axe des ordonnées pour chaque taxa représente le nombre de réplicas de PCR dans lequel des séquences d'ADN ont été détectés (maximum 4). Les deux taxa les plus détectés, *Alnus* et *Saliceae*, que nous avons détectés en quantité non-négligeable dans les contrôles et ayant donc une composante due à de la contamination, ont également été représentés en fonction du nombre de séquences d'ADN (en échelle logarithmique pour corriger de l'amplification exponentielle lors de la PCR). Cette représentation a également été adoptée pour les épilobes qui au contraire ont été très peu détectés (1 réplica) mais présente un signal structuré (non-stochastique).

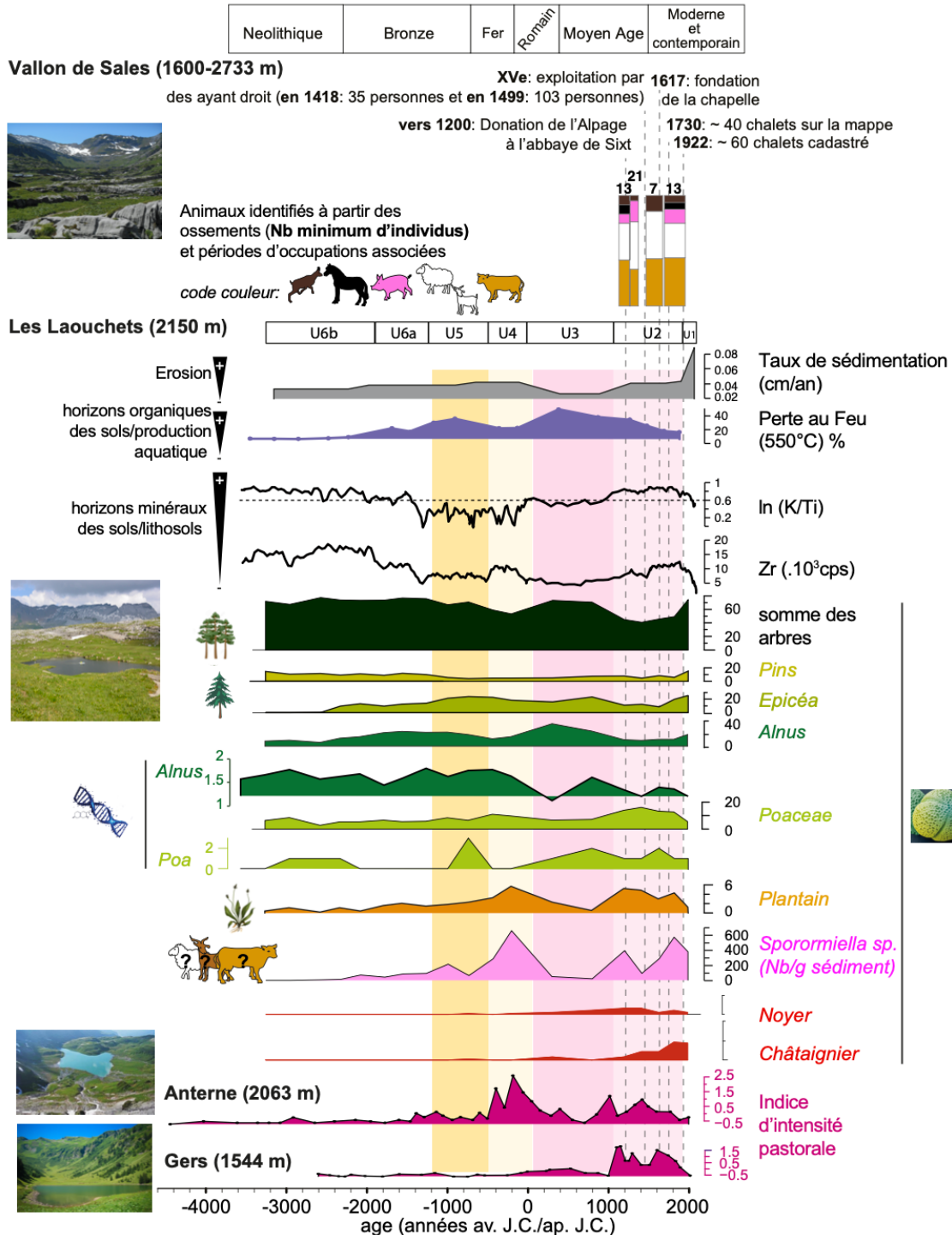


Figure 6. Évolution des paysages, de l'érosion et de l'occupation du Vallon de Sales, incluant le bassin versant du Lac des Laouchets Bis et comparaison avec les activités pastorales connues⁸⁹ dans les alpages d'Anterne et Gers. Les données de pollen sont représentées en pourcentage, d'ADN de plantes, en nombre de répliques positifs (Poa) ou nombre de copies d'ADN transformé en logarithme (Alnus) et les spores de Sporormiella en concentration (Nb/g de sédiment). Ces données paléo environnementales sont comparées aux données archéozoologiques et historiques.