COMMUNICATION DE RECHERCHE

# Trajectoires d'évolution des sols et des agroécosystèmes de montagne de l'Holocène à l'Anthropocène

## *Evolution of mountain soil and agroecosystem trajectories from Holocene to Anthropocene*

par **Manon BAJARD**[1]


## *Résumé*

L'ambition de ce travail est d'étudier l'évolution des interactions homme-environnement, au travers de l'évolution des sols et des pratiques agro-pastorales de montagne. Il s'agit de comprendre les mécanismes de réponse des écosystèmes à des perturbations d'origines climatiques et anthropiques, en termes de durabilité et de résilience afin d'en garantir la pérennité.

La reconstitution de l'évolution des sols et de leurs usages, tirée d'archives sédimentaires lacustres ***(Fig. 1, 2)***, met en évidence un développement progressif des sols sur la première moitié de l'Holocène ***(Fig. 4)***, puis des pédogénèses régressives avec le développement des activités agro-pastorales, autour de l'Antiquité et du Moyen Âge ***(Fig. 3)***, s'accompagnant d'augmentations de l'érosion ***(Fig. 3, 5)***.

Les mécanismes de résilience s'avèrent dominés par l'établissement de nouveaux états d'équilibre ***(Fig. 5)*** et témoignent des modifications profondes exercées sur les milieux de montagne depuis plusieurs millénaires où l'homme apparait comme le principal agent de la pédogénèse.

## *Abstract*

*In a context of increasing pressures on ecosystems, evolution of land use and climate changes, the future of alpine pastoral landscape, shaped throughout centuries by mutual interactions between societies and environment, remains uncertain. This study aims at characterizing the evolution of human-environment interactions, through the evolution of soils and mountain agro-pastoral practices in the North-Western Alps* ***(Fig. 2)****. We try to understand the response mechanisms of ecosystems to climate and human disruptions, in terms of sustainability and resilience to ensure their continuity.*

*The reconstitution of soil evolution and their uses by the comparison of paleoenvironmental reconstructions derived from lacustrine archives* ***(Fig. 1, 2)*** *evidenced a progressive development of soils during the first part of the Holocene, associated with substrate decarbonatation, acidification then podzolization of soils in the Holocene Climate Optimum* ***(Fig. 4)****. The second part of the Holocene is characterized by regressive pedogenesis, in response to agro-pastoral activities development, mainly around the Roman and Medieval periods, along with erosion increases* ***(Fig. 3, 5)****. Environmental disruptions triggered colluviation movements and a regression of soil weathering* ***(Fig. 5)****, leading to a multiplication of soil evolution trajectories and a higher soil diversity in the Anthropocene* ***(Fig. 4)****.*

*The soils developed until first human settlements present a higher capacity of resistance to erosion than soils developing thereafter. Resilience processes appear to be dominated by the establishment of new agroecosystem steady states and attest of the deep modifications performed on mountain environments for several millennia where human appears as the main pedogenetic factors.*


[1] Courriel : manon.bajard@gmail.com
Laboratoire EDYTEM – CNRS UMR 5204 – Université Savoie Mont-Blanc, 73376 Le Bourget-du-Lac.
Communication de recherche présentée par Christian Walter, section 7.

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

## A. *Introduction*

Les sols jouent un rôle prépondérant dans notre environnement en fournissant des services essentiels à la vie, dits « services écosystémiques » (Daily et al., 1997). Les sols sont en effet le support de notre alimentation, de nos habitats et du paysage. Ils garantissent la qualité des eaux, régulent les précipitations, les inondations et sont capables de compenser nos émissions de carbone dans l'atmosphère. Ils constituent ainsi le principal compartiment de la zone critique, fine couche à la surface de la Terre où se développent les sociétés humaines en interactions avec l'environnement, et où les pressions croissantes sur les sols font craindre une perte accélérée et une dégradation de cette ressource non renouvelable (MEA, 2005; Anderson et al., 2007; Chorover et al., 2007). Or l'évolution des processus de formation des sols et les effets des pressions anthropiques restent méconnus compte tenu de la diversité des situations et des temps de réactions très variables des propriétés des sols et de leur fonctionnement, et justifient l'absence de politique de protection et de gestion des sols comme c'est le cas pour l'eau et la biodiversité.

L'objectif de cette recherche est de comprendre l'évolution des interactions homme-environnement, au travers de l'histoire des sols, tant du point de vue de leur fonctionnement pédologique que de leur usage (agro-pastoral notamment). Il s'agit de mettre en évidence puis de comprendre les types de réponses des sols aux modifications des milieux (climat, végétation) et aux activités humaines (déforestation, mise en culture, pâturage, déprise agricole…) qui se sont succédé depuis plusieurs millénaires, d'un point de vue quantitatif (érosion) et qualitatif (modifications des propriétés des sols), en termes de résilience et de durabilité. Mieux appréhender le fonctionnement des agro-socio-écosystèmes dans leur ensemble constitue aujourd'hui un enjeu scientifique important pour garantir leur pérennité dans une logique de développement durable.

Cette étude est basée sur une approche paléo-environnementale pluridisciplinaire combinant l'analyse de sols actuels et l'analyse de séquences sédimentaires lacustres comme archives de l'environnement d'où vont être extrait des informations sur l'érosion des sols et leur nature, et sur l'évolution des paysages.

## B. *Une approche méthodologique originale et pertinente pour étudier la pédogénèse : utilisation des sédiments lacustres comme archives continues et long terme de l'érosion des sols*

La nécessité d'étudier les processus pédologiques sur des temps plus long que quelques siècles a impliqué l'utilisation d'archives sédimentaires lacustres **(Figure 1)**. Les sédiments des lacs enregistrent au cours du temps et de façon stratigraphique de l'érosion, témoin des sols en présence autours des lacs, et des informations sur l'état du paysage via le piégeage de pollen ou d'ADN par exemple **(Figure 1)**. Ces archives naturelles offrent ainsi la possibilité de reconstituer à la fois l'histoire évolutive de la végétation, les activités agricoles mais également l'évolution des sols par identification de « signatures pédologiques », c'est-à-dire d'éléments identifiables discriminant une origine pédologique particulière (Poulenard, 2011). Nous faisons l'hypothèse que ces signatures sont représentatives des types de sols du bassin versant dont elles sont issues et qu'elles ne sont pas altérées pendant leur transfert jusqu'au lac et par la diagénèse dans les sédiments du lac.

### *Sites d'étude : quatre systèmes lac-bassin versant des Alpes Nord occidentales*

Les lacs de **La Thuile** (875 m) dans les Bauges, le lac **Verney** (2088 m) au col du Petit Saint Bernard, le lac **Bénit** (1450 m) dans le Bargy et le lac de **Gers** dans le Haut Giffre ont été choisi pour

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

ce travail de thèse de façon à couvrir le territoire des deux Savoie, à des altitudes différentes et sur des substrats géologiques contrastés (Figure 2). Ils ont également été choisi vis-à-vis de pratiques actuelles ou historiques pertinentes connues.

La synthèse de ce travail incorpore également les résultats des travaux réalisés sur les sites lacustres du Thyl, du Loup, d'Anterne et de Savine sur lesquels ont été développées plusieurs des méthodes utilisées dans ce travail pour reconstituer l'évolution des sols et/ou des pratiques agro-pastorales **(Figure 2)**.

***Démarche scientifique***

Des carottes de sédiments de chacun des quatre lacs étudiés ont été prélevés par carottage puis analysées au laboratoire. Les séquences sédimentaires ont été datées principalement au carbone 14. Leur analyse multiproxies (granulométrie, perte au feu, géochimie organique et minérale), comparée aux analyses des sols de chaque bassin versant, a permis d'identifier dans le mélange de sédiment les sources sédimentaires transférées par érosion et de les isoler de la production biologique interne au lac.

*Approche qualitative*

Les sols des bassins versants ont été décrits puis échantillonnés par horizon. Ils ont été analysés (pH, perte au feu, géochimie XRF…) et leurs caractères discriminants (d'un type de sol ou d'horizon particulier) ont été identifiés puis recherchés dans les sédiments lacustres (*e.g.*, degrés d'altération des sols avec le rapport K/Ti, transformation des matières organiques par pyrolyse rock-eval, formes de fer et d'aluminium pour les horizons podzoliques). On réalise ainsi les mêmes analyses dans les mêmes conditions sur les sols et sur les sédiments pour les relier sur chacun des sites selon une approche « source-puits » et le principe d'actualisme.

*Approche quantitative*

L'érosion des sols a été estimée en considérant le taux d'accumulation de sédiments détritiques, le volume du remplissage sédimentaire lacustre et la surface de chaque bassin versant (Enters et al., 2008; Massa et al., 2012).

*Modifications de la végétation et des pratiques agricoles*

Les évolutions de la végétation et des activités agro-pastorales ont été reconstituées à partir de comptages polliniques, de comptages de spores de champignons coprophiles (indicateurs de pression pastorale) et d'analyses d'ADN extra-cellulaire (végétaux et mammifères) réalisés sur les sédiments.

## *C. Intégration régionale des trajectoires d'évolution des paysages agropastoraux alpins et des sols*

### 1 - Enregistrement de l'érosion dans les archives lacustres

Les séquences lacustres des quatre sites étudiés fournissent un enregistrement de l'érosion en lien avec les activités pastorales au cours des 4000 dernières années **(Figure 3)**. Seuls les sédiments du lac de Gers enregistrent en plus, des variations du climat, qui se surimposent aux activités de l'homme à la période médiévale et au Petit Age Glaciaire. Nous montrons que pour chacun de ces sites, l'érosion est essentiellement forcée par le développement des activités humaines (*e.g.,* Bajard et al., 2016, 2017b), et masque l'effet des fluctuations climatiques ou les exacerbe dans le cas du site de Gers. L'érosion apparait quantitativement plus faible en altitude reflétant une période d'activité (pastorale et végétative) plus courte du fait de la couverture neigeuse hivernale protégeant les sols **(Figure 3)**. A plus basse altitude

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

comme à La Thuile l'habitat et les activités sont en revanche possibles toute l'année et se traduisent par une érosion plus importante. Le réchauffement du climat pourrait ainsi conduire à une augmentation de l'érosion des sols en altitude, en réponse à la diminution de la couverture neigeuse.

### 2 - Evolution pluri-millénaire des paysages agro-pastoraux

La comparaison des chroniques paléo-environnementales de ces quatre sites **(Figure 3)** avec les enregistrements des lacs d'Anterne (Giguet-Covex et al., 2015) et de Savine (Sabatier et al., 2017) a permis de conforter l'hypothèse d'un développement des espaces de pâturage d'abord en altitude à l'âge du bronze et à l'âge du fer, puis une progression de l'activité pastorale à toutes les altitudes à l'Antiquité avec une hétérogénéité des pratiques (troupeaux bovins ou ovins). La période entre l'Antiquité et le Moyen Âge est marquée par une déprise des activités et une recolonisation forestière, en lien possible avec une dégradation du climat **(Figure 3)**. Les activités d'alpage reprennent au Moyen Âge, à nouveau dans une dynamique de l'amont vers l'aval avec une plus grande extension des espaces pastoraux à l'étage subalpin **(Figure 3)**. Cette reprise est caractérisée d'abord essentiellement par des troupeaux de moutons, de vaches, puis progressivement uniquement par des bovins à partir du XV$^{ème}$ siècle, de façon cohérente avec les documents historiques et le développement de la culture des « grands fromages ». Le développement des territoires alpins semble s'être dessiné autour des deux grandes périodes pastorales, à l'Antiquité et au Moyen Âge avec la succession de périodes de pâturage/déboisement - déprise/reboisement – reprise/extension des espaces pastoraux.

### 3 - Modification de l'évolution des sols des Alpes Nord occidentales de l'Holocène à l'Anthropocène

La comparaison des reconstitutions pédo-paléo-environnementales tirées des archives lacustres des lacs de La Thuile, Bénit, Gers, Anterne, Verney, Loup et Thyl, met en évidence un développement progressif des sols sur la première moitié de l'Holocène, avec la décarbonatation des substrats, suite au retrait des glaciers, l'acidification des sols puis leur podzolisation à l'optimum climatique Holocène (4000 à 6000 ans cal. BP), selon l'altitude des sites et leur géologie **(Figure 4)**. La seconde moitié de l'Holocène est marquée par des pédogénèses régressives avec le développement des activités agro-pastorales, principalement autour de deux grandes périodes, Antiquité et Moyen Âge, s'accompagnant d'augmentations de l'érosion. Ces perturbations environnementales entrainent de façon généralisée du colluvionnement et une régression dans l'altération des profils, se traduisant par un rajeunissement des pédogénèses et conduisant à une multiplication des trajectoires d'évolution des sols et une plus grande diversité pédologique dans l'Anthropocène **(Figure 4)**.

## *D. Durabilité de la ressource en sol et des pratiques : pédogénèse progressive et régressive*

Un moyen simple d'évaluer la durabilité de la ressource est de comparer la formation de sol à son érosion. L'érosion mesurée par l'analyse de l'archive sédimentaire lacustre est comparée à une modélisation de la formation des sols considérant l'épaisseur et l'âge de sols (Egli et al., 2014; Alewell et al., 2015). Le système agropastoral et la ressource en sol sont considérés durables tant que l'érosion ne surpasse pas la production de sol. Cette évaluation nous a permis de décrire des phases de progression et de régression de la couverture pédologique au lac de La Thuile (Bajard et al., 2017a). Ces phases décrites quantitativement sont par ailleurs cohérentes avec les mesures d'altération des matériaux érodés et analysés dans la séquence, à la fois sur la fraction minérale et sur la faction organique du sol qui sont des mesures indépendantes **(Figure 5)**. On enregistre ainsi l'érosion successive des horizons des sols du bassin versant du lac de La Thuile en réponse au développement des activités agro-pastorales **(Figure 5)**. Au cours du Moyen Age, un changement dans les pratiques agricoles avec l'apparition de vergers (poiriers, prunier, noyers…) et de la vigne dans le bassin versant **(Figure 5)**, et la multiplication des

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

parcelles et des haies sur les versants viennent diminuer l'érosion, marquant un retour à un état plus durable de l'écosystème. Cette diminution dans l'intensité des processus d'érosion a sans doute été amplifiée ensuite par des effets sociétaux et climatique, avec le déclin de la moitié de la population du massif de Bauges, lié à la peste, et le refroidissement du climat au Petit Age Glaciaire ne permettant peut-être plus certaines cultures à cette altitude. L'activité érosive est à nouveau très intense sur la période entre les XVIII et XX$^{ème}$ siècles en lien avec un déboisement maximal des territoires de montagne, avant la déprise agricole récente **(Figure 5)**.

L'intensité de l'érosion, globalement moins forte au moment des premières occupations humaines (lors des premiers déboisements), suggère une plus grande résistance des sols développés jusqu'aux premières occupations humaines que les sols se développant ensuite. Cette résistance pourrait s'expliquer par des propriétés différentes des sols, avec par exemple des taux de matières organiques plus importants dans les sols se développant avant le déploiement des activités humaines, et plus faible ensuite avec l'exploitation sur le long terme de la ressource, et entrainant une moindre résistance à l'érosion. Les mécanismes de résilience s'avèrent dominés par l'établissement de nouveaux états d'équilibre des agroécosystèmes, et témoignent des modifications profondes exercées sur les milieux de montagne depuis plusieurs millénaires. Ces modifications sont mémorisées par les sols et génèrent l'expression de rétro-effets sur les usages actuels. Ainsi sur le site du lac Bénit, un rehaussement du lac en 1964 a permis le relargage de phosphore des berges inondées, phosphore concentré sur les bords du lac par le pâturage établi depuis le Moyen Age. Cet apport de nutriment conduit aujourd'hui à l'eutrophisation du lac alors que le pâturage n'est plus aussi intense qu'auparavant comme en témoigne la reprise forestière récente.

## *E. Conclusion et perspectives associées*

L'analyse multiproxies des séquences sédimentaires des lacs de La Thuile (875 m, Bauges), Bénit (1450 m, Bargy), Gers (1540 m, Giffre) et Verney (2088 m, Italie, Col du Petit Saint-Bernard) et des sols de leur bassin versant a permis de reconstituer l'évolution des paysages agropastoraux et des sols des Alpes Nord occidentales au cours de l'Holocène et d'analyser les interactions entre le système agraire, l'érosion et les sols, en termes de durabilité et résilience.

Les sols des Alpes Nord occidentales suivent une trajectoire d'évolution commune progressive pendant la première partie de l'Holocène suite au retrait des glaciers, avec la formation de sols jeunes qui se décarbonatent et s'acidifient. Avec le développement des activités agro-pastorales à partir de l'Âge du fer, et surtout autour des périodes Antiques et médiévales, on assiste ensuite à une intensification de l'érosion des sols, leur rajeunissement, du colluvionnement dans tous les systèmes étudiés et la brunification des profils, traduisant une phase de régression des sols. Cette régression, à la fois sur l'épaisseur des sols et sur le développement pédologique des sols conduit à une multiplication des trajectoires de leur évolution et à une diversification des types de sols à l'échelle des Alpes Nord occidentales au cours des derniers millénaires, dont il faut tenir compte aujourd'hui dans les politiques d'aménagement et de gestion des territoires pour éviter des rétro-effets négatifs et garantir la durabilité de la ressource en adéquation avec les services écosystémiques désirés.

Les régimes d'érosion et l'évolution de l'altération présentent des mécanismes de résistance et de résilience semblables qui régissent les interactions entre le système agraire, l'érosion et les sols au sein de la zone critique. Ces interactions au sein de la zone critique forment un ensemble dynamique, lié de rétroactions induites, pour les derniers millénaires, par l'homme qui apparait ainsi comme étant le principal agent de la pédogénèse à l'Anthropocène.

Ce couplage disciplinaire offre aujourd'hui de nouvelles perspectives (cinétique, résilience, durabilité) pour la science du sol pour améliorer la compréhension du fonctionnement de cette zone critique.

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

## *Références bibliographiques*

Alewell, C., Egli, M., Meusburger, K., 2015. – An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. Journal of Soils and Sediments 15, 1383–1399. https://doi.org/10.1007/s11368-014-0920-6

Anderson, S.P., von Blanckenburg, F., White, A.F., 2007. –Physical and chemical controls on the critical zone. Elements 3, 315–319.

Bajard, M., Poulenard, J., Sabatier, P., Develle, A.-L., Giguet-Covex, C., Jacob, J., Crouzet, C., David, F., Pignol, C., Arnaud, F., 2017a. – Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene. CATENA 150, 39–52. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.001

Bajard, M., Poulenard, J., Sabatier, P., Etienne, D., Ficetola, F., Chen, W., Gielly, L., Taberlet, P., Develle, A.-L., Rey, P.-J., Moulin, B., Beaulieu, J.-L. de, Arnaud, F., 2017b. – Long-term changes in alpine pedogenetic processes: Effect of millennial agro-pastoralism activities (French-Italian Alps). Geoderma 306, 217–236. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.005

Bajard, M., Sabatier, P., David, F., Develle, A.-L., Reyss, J.-L., Fanget, B., Malet, E., Arnaud, D., Augustin, L., Crouzet, C., Poulenard, J., Arnaud, F., 2016. – Erosion record in Lake La Thuile sediments (Prealps, France): Evidence of montane landscape dynamics throughout the Holocene. The Holocene 26, 350–364.

Chorover, J., Kretzschmar, R., Garcia-Pichel, F., Sparks, D.L., 2007. – Soil biogeochemical processes within the critical zone. Elements 3, 321–326.

Daily, G.C., Matson, P.A., Vitousek, P.M., 1997. - Ecosystem services supplied by soil. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems 113–132.

Egli, M., Dahms, D., Norton, K., 2014. – Soil formation rates on silicate parent material in alpine environments: Different approaches–different results? Geoderma 213, 320–333. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.016

Enters, D., Dorfler, W., Zolitschka, B., 2008. – Historical soil erosion and land-use change during the last two millennia recorded in lake sediments of Frickenhauser See, northern Bavaria, central Germany. The Holocene 18, 243–254. https://doi.org/10.1177/0959683607086762

Giguet-Covex, C., Arnaud, F., Poulenard, J., Disnar, J.-R., Delhon, C., Francus, P., David, F., Enters, D., Rey, P.-J., Delannoy, J.-J., 2011. – 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, 651–665. https://doi.org/10.1177/0959683610391320

Giguet-Covex, C., Gentile Ficetola, F., Fouinat, L., Bajard, M., Gielly, L., Walsh, K., Mocci, F., Develle, A.-L., Brisset, E., Arnaud, F., Poulenard, J., 2015. - Histoire de l'agriculture dans les Alpes françaises: un nouveau regard fournit par l'ADN sédimentaire lacustre. 15ème Congrès français de sédimentologie.

Holzhauser, H., Magny, M.J., Zumbühl, H.J., 2005. – Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. The Holocene 15, 789–801. https://doi.org/10.1191/0959683605hl853ra

Le Roy, M., Nicolussi, K., Deline, P., Astrade, L., Edouard, J.-L., Miramont, C., Arnaud, F., 2015. Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial: the Mer de Glace record, Mont Blanc massif. Quaternary Science Reviews 108, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.033

Massa, C., Bichet, V., Gauthier, É., Perren, B.B., Mathieu, O., Petit, C., Monna, F., Giraudeau, J., Losno, R., Richard, H., 2012. – A 2500 year record of natural and anthropogenic soil erosion in South Greenland. Quaternary Science Reviews 32, 119–130. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.11.014

MEA, M.E.A., 2005. – Ecosystems and human well-being: synthesis. Island, Washington, DC.

Mourier, B., 2008. – Contribution de l'approche sédimentologique à la reconstitution de l'histoire des sols. Définition de traceurs pédologiques et application sur des sédiments lacustres de montagne (Maurienne, Savoie, France). Université de Savoie.

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

Mourier, B., Poulenard, J., Carcaillet, C., Williamson, D., 2010. – Soil evolution and subalpine ecosystem changes in the French Alps inferred from geochemical analysis of lacustrine sediments. Journal of Paleolimnology 44, 571–587. https://doi.org/10.1007/s10933-010-9438-0

Mourier, B., Poulenard, J., Chauvel, C., Faivre, P., Carcaillet, C., 2008. – Distinguishing subalpine soil types using extractible Al and Fe fractions and REE geochemistry. Geoderma 145, 107–120. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.03.001

Poulenard, J., 2011. – Des empreintes pédologiques dans les bassins versants et les archives naturelles. Université de Savoie.

Sabatier, P., Wilhelm, B., Ficetola Gentile, F., Moiroux, F., Poulenard, J., Develle, A.-L., Bichet, A., Chen, W., Pignol, C., Reyss, J.-L., Gielly, L., Bajard, M., Perrette, Y., Malet, E., Taberlet, P., Arnaud, F., 2017. – 6-kyr record of flood frequency and intensity in the western Mediterranean Alps – Interplay of solar and temperature forcing. Quaternary Science Reviews 170, 121–135. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.06.019

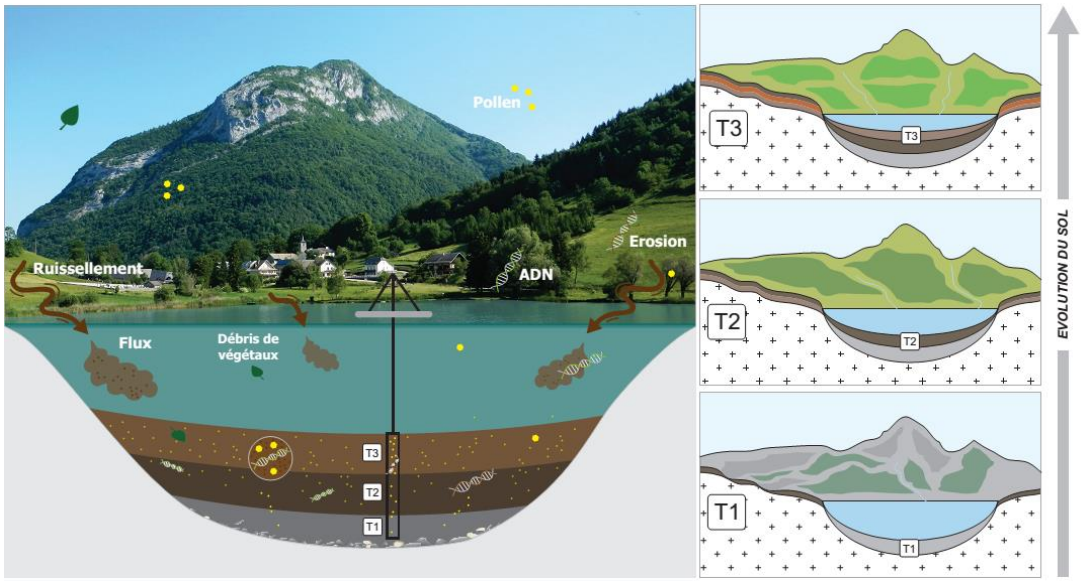


***Figure 1.*** *Schéma de l'enregistrement sédimentaire lacustre et de l'archivage des « pédosignatures », modifié d'après Mourier (2008).*

***Figure 1.*** *Diagram of lacustrine sedimentary record and « pedosignatures », adapted from Mourier (2008).*

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

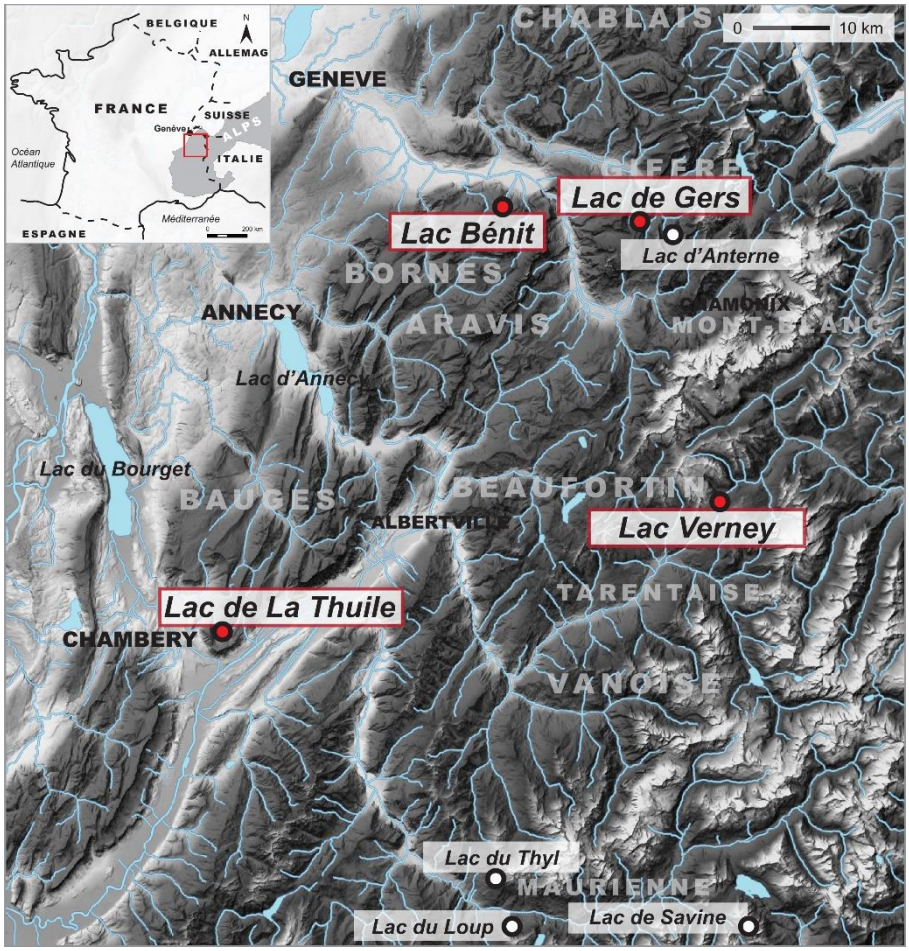


***Figure 2.*** *Localisation des systèmes lac-bassin versant des Alpes Nord occidentales étudié pour reconstituer les trajectoires d'évolution des sols et des agroécosystèmes au cours de l'Holocène.*

***Figure 2.*** *Location of lake-catchment systems from the North-Western Alps studied to reconstruct the evolution of soil and agroecosystem trajectories throughout the Holocene.*

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

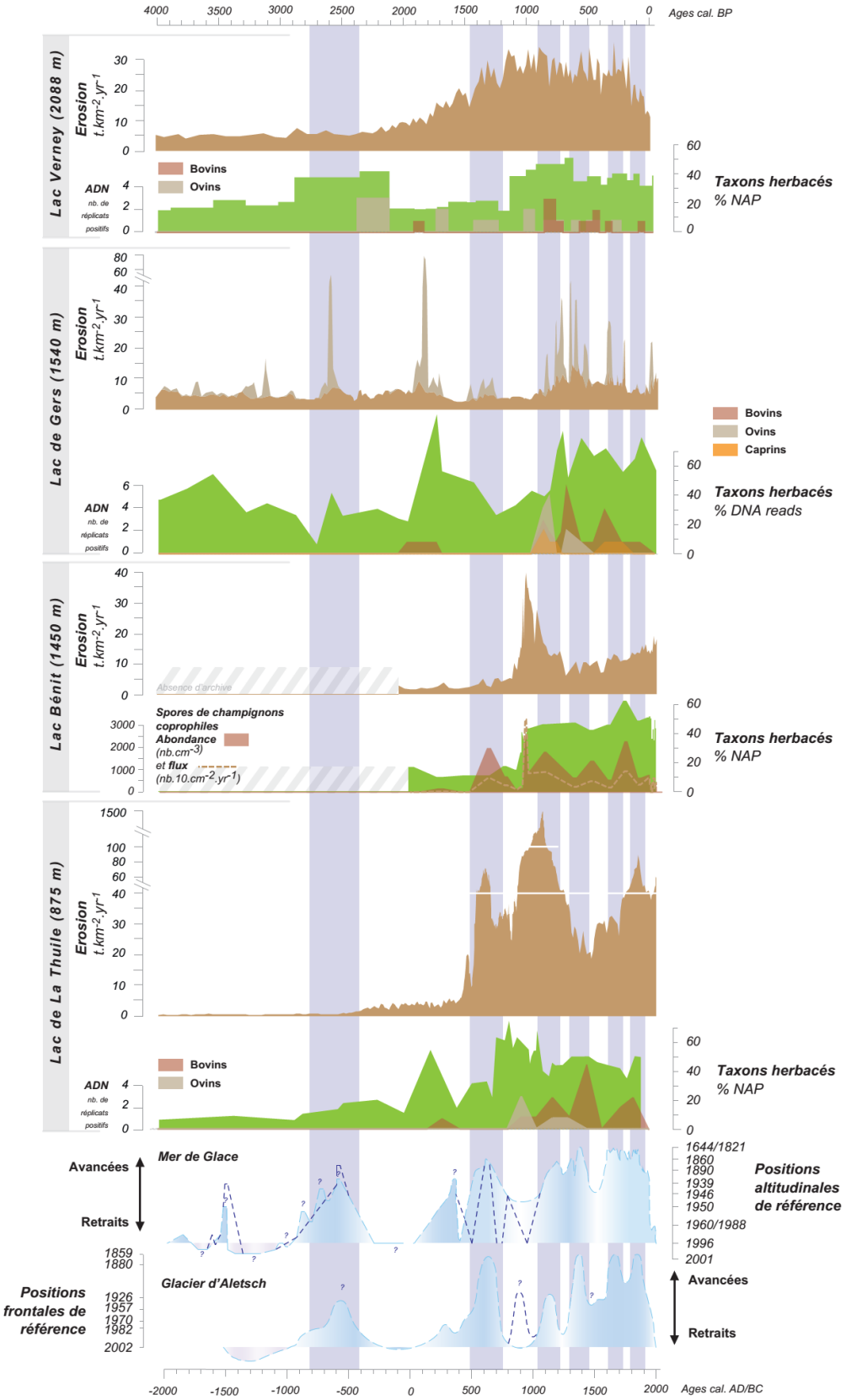


***Figure 3.*** *Comparaison des dynamiques d'érosion et des paysages de quatre sites alpins avec les avancées de la Mer de Glace (Le Roy et al., 2015) et du glacier d'Aletsch (Holzhauser et al., 2005).*

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

***Figure 3.*** *Comparison of erosion and landscape dynamics from the four alpine studied sites with the advances of Mer de Glace (Le Roy et al., 2015) and Aletsch (Holzhauser et al., 2005) glaciers.*

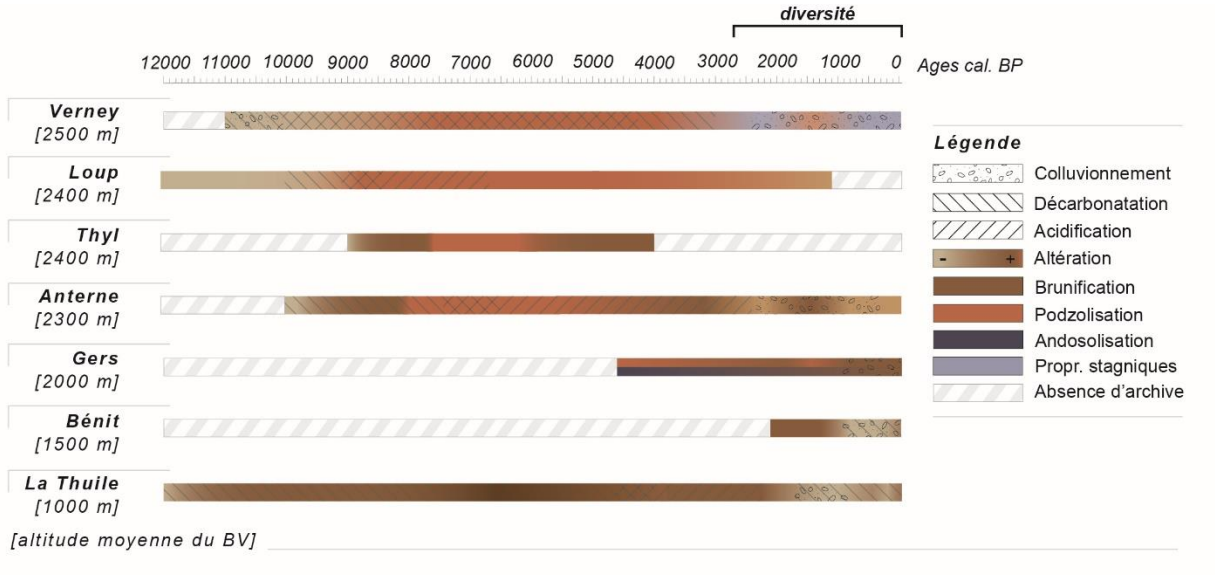


***Figure 4.*** *Reconstitution des trajectoires d'évolution pédogénétiques des bassins versants des lacs Verney, Gers, Bénit, et La Thuile (ce travail) et des lacs du Thyl et du Loup d'après Mourier (2008) et Mourier et al. (2010), et d'Anterne d'après Giguet-Covex et al. (2011), par l'étude de leurs sédiments lacustres. Le caractère de colluvionnement est associé aux périodes de plus forte érosion lorsque des Colluviosols ont été identifiés dans le bassin versant concerné.*

***Figure 4.*** *Soil evolution of the catchments of Lakes Verney, Gers, Benit and La Thuile (this work) and of the catchments of Lakes Thyl, Loup (Mourier, 2008; Mourier et al., 2008), and Anterne (Giguet-Covex et al., 2011), from their respective lake sediment study. Colluvium movements were associated to the highest erosion periods when they were identified in the field.*

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.

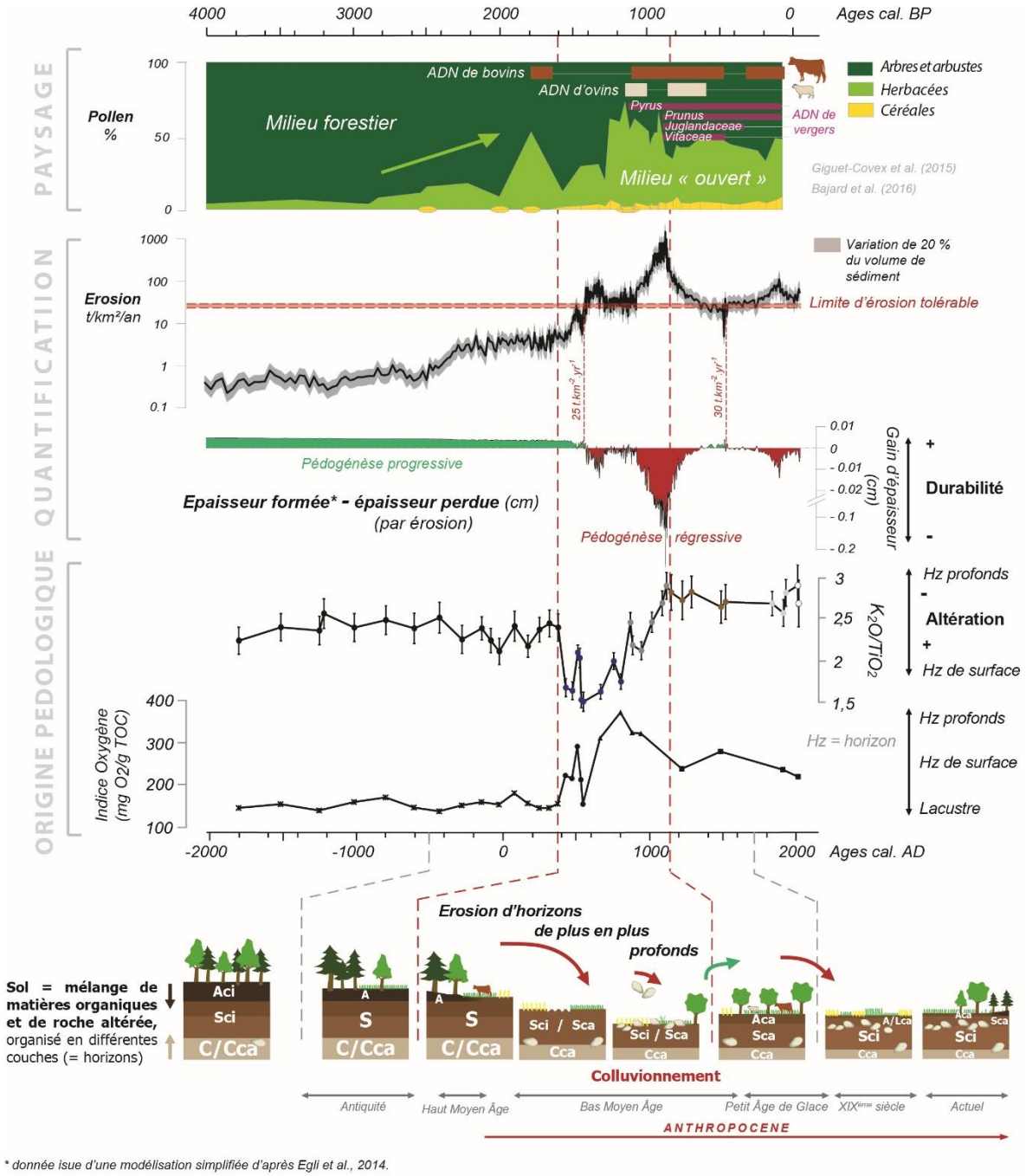


***Figure 5.*** *Reconstitution de l'évolution passée des sols à partir de l'érosion et de la géochimie des sédiments du lac de La Thuile. Le diagramme palynologique simplifié et les données ADN sont adaptés de Bajard et al. (2016) et de Giguet-Covex et al. (2015), respectivement, et montrent l'évolution globale du paysage (végétation) et des activités agro-pastorales. La limite d'érosion tolérable découle de l'érosion qui génère le début d'une phase de régression.*

***Figure 5.*** *Reconstruction of past soil evolution by comparing the erosion recorded in Lake La Thuile's sediments with its geochemistry. The simplified palynological diagram and the DNA presence, which were adapted from Bajard et al. (2016) and from Giguet-Covex et al. (2015), respectively, show the global evolution of the land use and agro-pastoral activities in the catchment. The tolerable erosion limit as obtained from the minimal erosion that triggers a negative soil balance.*

Copyright Académie d'agriculture de France, 2018.