Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande

Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise

Band: 152 (2015)

Artikel: Onnens-Praz Berthoud (canton de Vaud, Suisse) : contexte, environnement et occupations du Mésolithique au début du Néolithique

Autor: Jakob, Bastien / Falquet, Christian / Arbogast, Rose-Marie

Kapitel: 3: Étude sédimentologique et micromorphologique

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-835636

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES

3. Etude sédimentologique et micromorphologique

Michel Guélat, David Brönnimann et Christine Pümpin

3.1. Introduction

Au cours des travaux de terrain effectués sur le site d'Onnens-Praz Berthoud, de nombreux échantillons de sédiments ont été prélevés pour d'éventuelles analyses ultérieures. En 2010, des échantillons provenant de trois colonnes stratigraphiques – situées au nord-est du site, à proximité de la résurgence karstique – ont été sélectionnés pour une étude sédimentologique et micromorphologique, menée conjointement à une étude malacologique (chap. 4).

Les principaux objectifs de cette étude sédimentologique et micromorphologique étaient de définir la nature et l'origine des sédiments progressivement accumulés sur le site et de décrypter l'empreinte des activités humaines. L'approche s'appuie sur deux processus analytiques distincts. Il s'agit premièrement d'une caractérisation par les méthodes sédimentologiques – approche essentiellement séquentielle des dépôts – avec, en parallèle, une mise en évidence des apports anthropiques potentiels à l'aide de paramètres géochimiques. Dans un second temps, il est question d'une analyse micromorphologique – ou analyse de sédiments sous microscope – réalisée par David Brönnimann et Christine Pümpin, du Laboratoire de Géoarchéologie de l'IPNA[3]. Cette étude s'effectue également sur une succession sélective de dépôts pour déterminer leur mode de mise en place, identifier les traces de pédogenèse laissées par les sols enfouis et détecter les indices d'occupation humaine. La synthèse de l'ensemble des résultats permet, en conclusion, de proposer une reconstitution des événements pédosédimentaires.

3.1.1. Remerciements

Nous tenons à adresser de sincères remerciements à Christian Falquet, archéologue responsable du projet, et Marc Wittig pour la documentation transmise. Un grand merci également à Philippe Rentzel, directeur du Laboratoire de Géoarchéologie de l'IPNA, pour les conseils et la relecture critique du manuscrit. Nos remerciements s'adressent aussi à : Beatrix Ritter, laborante à ce même institut, qui a effectué les analyses sédimentologiques ; Julie Boreham[4] de Cambridge, qui s'est chargée de la fabrication des lames minces ; Anne-Laure Berthet de Bordeaux, qui nous a remis les lames de Praz Berthoud produites antérieurement à notre étude[5]. Merci enfin à Nicole Pousaz, archéologue cantonale de l'Etat de Vaud, pour la confiance témoignée.

3.2. Méthodes

3.2.1. Les prélèvements

Les échantillons de sédiments récoltés au cours des travaux de fouilles à Praz Berthoud nous ont été

[3] *Institut für Prähistorische und Naturwissenschaftliche Archäologie* de l'Université de Bâle.

[4] Julie Boreham, Prospect House, Cambridgeshire, England.

[5] Ces lames minces ont été fabriquées en 2003 à l'Institut de Préhistoire et de Géologie du Quaternaire de l'Université de Bordeaux (aujourd'hui unité mixte PACEA – De la Préhistoire à l'Actuel, Cultures, Environnement et Anthropologie).

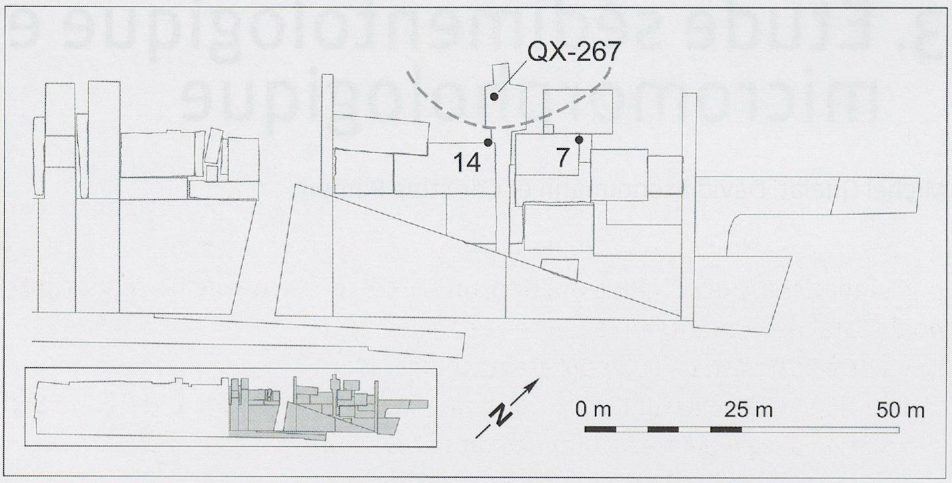


Fig. 23. Localisation des trois colonnes étudiées à proximité du cône de tuf (limite grise).

remis en 2010, soit plusieurs années après la fermeture du chantier. Nous n'avons donc pas eu l'occasion d'observer sur le terrain même les profils étudiés. La documentation stratigraphique et photographique a toutefois permis de se faire une bonne représentation des différentes coupes de référence. Pour répondre aux objectifs, le choix des prélèvements s'est porté sur trois colonnes localisées au nord-est du site, à proximité de la source, là où les couches sont bien conservées et le plus dilatées (fig. 23). L'étude a donc un caractère très ciblé – confiné à un secteur du site – cependant, elle se base sur des prélèvements idéalement situés dans la stratigraphie, qui permettent d'illustrer relativement bien l'ensemble de la séquence. Le premier profil sélectionné, soumis aussi bien aux analyses sédimentologiques qu'à la micromorphologie, est en réalité la compilation de la partie supérieure de la colonne 7 et de la partie inférieure de la colonne 14 (fig. 24). Le second profil, la colonne QX-267, comprend des tufs calcaires et a été traité uniquement comme complément pour la sédimentologie. Au total, 21 échantillons de sédiment en vrac ont ainsi été traités par les analyses sédimentologiques et 9 blocs de sédiments orientés et non perturbés constituent le corpus pour la micromorphologie.

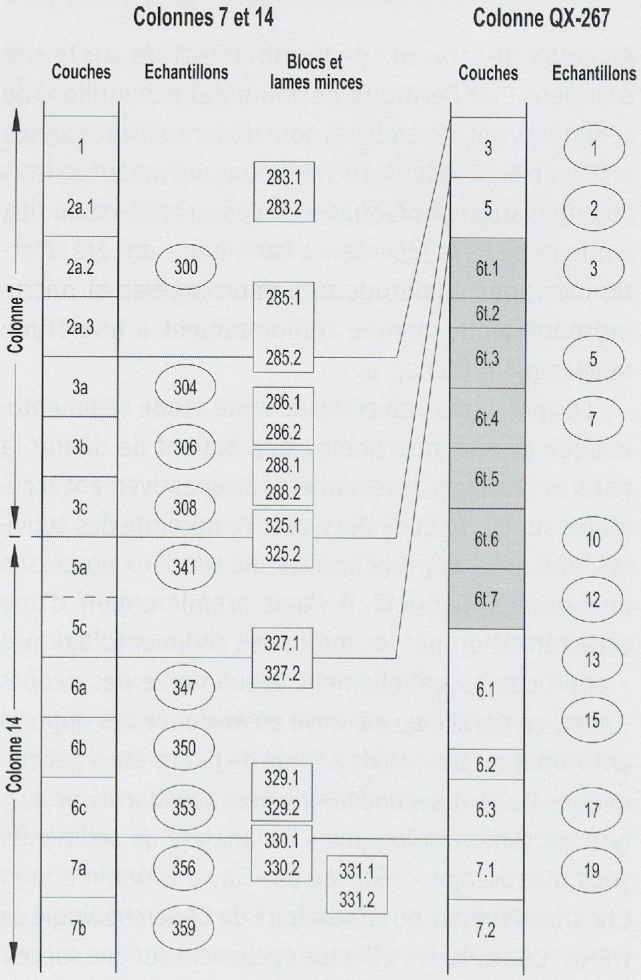


Fig. 24. Position stratigraphique des 21 échantillons et des neuf blocs de sédiments prélevés dans les deux profils étudiés (col. 7 et 14, col. QX-267). En grisé : les niveaux de tuf.

3.2.2. La granulométrie

Cette analyse a été effectuée au Laboratoire de l'IPNA. Les fractions graveleuses des échantillons (>2 mm) ont été mesurées par tamisage à sec. Les fractions sableuses (de 63 microns à 2 mm) ont subi

un tamisage humide sur colonne vibrante, selon le procédé classique. Quant à la fraction silto-argileuse (<63 microns), elle a été analysée à l'aide d'un granulomètre à laser[6]. Le traitement informatique des résultats bruts a été effectué grâce à une application du logiciel Excel (Guélat 2008). La construction de la courbe granulométrique s'effectue par calcul proportionnel, soit, pour chaque fraction, un rapport au poids total de l'échantillon analysé[7]. Ce logiciel permet entre autres de calculer différents indices, dont le coefficient de classement So et celui d'asymétrie Sk[8]. De plus, il peut exécuter des requêtes selon différents critères pour sélectionner des groupes d'échantillons.

En complément aux données de la granulométrie, un examen rapide à la loupe binoculaire[9] des sables grossiers (0.5 à 1 mm) a été effectué pour certains échantillons, afin de confirmer le diagnostic.

3.2.3. La géochimie

Des tests géochimiques ont également été réalisés au Laboratoire de l'IPNA sur les mêmes échantillons que la granulométrie, plus précisément sur leurs fractions <0,5 mm. Ces analyses comprennent : la teneur en carbonates, mesurée à l'aide d'un calcimètre de Müller (exprimée en %) ; le contenu en matière organique par perte au feu (en %), résultant d'une combustion au four à 1000°C avec correction du carbone lié aux carbonates ; la teneur totale en phosphates obtenue par colorimétrie – cette méthode étant semi-quantitative – elle fournit des résultats en unités colorimétriques (ou u.c.) ; les valeurs de matière organique fine (« humus »), également par méthode colorimétrique (en u.c.) ; enfin, le pH, mesuré sur une solution de chlorure de potassium (pH KCl).

3.2.4. L'analyse micromorphologique

Technique issue de la pédologie, la micromorphologie consiste en un examen microscopique de sédiments meubles, préalablement indurés. Un de ses points forts réside dans la conservation de l'organisation spatiale du sédiment, ce qui permet de hiérarchiser dans le temps les différents processus génétiques. Pratiquement, sur le terrain, des blocs de sédiments orientés et non perturbés sont prélevés à l'aide de bande plâtrée dans les couches à analyser, dans des coupes stratigraphiques. Le traitement en laboratoire consiste tout d'abord en un séchage à l'étuve, puis en une induration sous vide à l'aide de résine époxyde liquide. Après polymérisation de la résine, le bloc induré est débité en plaques d'environ 1 cm d'épaisseur à l'aide d'une scie diamantée. A partir de ces tranches polies, des talons au format 5.8 x 4.2 cm et 7.5 x 5 cm sont sélectionnés pour la fabrication des lames minces. Au total, un corpus de 18 lames a ainsi été fabriqué. Puis, celles-ci ont été examinées grâce à l'utilisation conjointe d'une loupe binoculaire[10] et d'un microscope polarisant[11], à un grossissement maximal de 630x. Les descriptions et observations ont été effectuées selon les protocoles préconisés par Bullock *et al.* (1985), Courty *et al.* (1989) et Goldberg et Macphail (2006). En plus de cette vingtaine de lames, 10 lames minces provenant des colonnes 5, 6A, 6B et 31 (zones 18 et 20), qui nous ont été ultérieurement transmises, ont été rapidement analysées. Celles-ci ne sont que sporadiquement mentionnées, lorsque d'importantes données complémentaires aux colonnes 14 et 7 sont disponibles.

[6] Appareillage de type Malvern Mastersizer MS20 qui, précisons-le, ne permet pas d'analyser les fractions sableuses supérieures à 1 mm.

[7] Les résultats du granulomètre laser sont exprimés en % volumiques et peuvent de ce fait différer de ceux issus d'une méthode pondérale. Une série de tests a en effet montré que la teneur en argiles (<2 microns) a tendance à être sous-estimée par la mesure au laser, en particulier pour les échantillons riches en particules fines, ce qui est rarement le cas sur le site de Praz Berthoud : la teneur en argiles dépasse rarement 10%.

[8] Indices calculés : la médiane Md à 50%, les quartiles à 25% (Q1) et 75% (Q3), ainsi que le centile à 99% (C) ; à partir de ceux-ci sont tirés les Paramètres de Trask :

a) Indice de classement So = (Q3/Q1)1/2 :
So <2,5 : sédiment très bien classé ;
2,5<So<3,5 : sédiment bien classé ;
3,5<So<4,5 : sédiment normalement classé ;
So>4,5 : sédiment mal classé.

b) Coefficient d'asymétrie Sk = Q3xQ1 /Md2 :
Sk=1 : symétrie parfaite ;
Sk>1 : meilleur classement côté éléments fins ;
Sk<1 : meilleur classement côté éléments grossiers.

[9] Loupe binoculaire de type Wild M3Z.

[10] Loupe binoculaire de type Leica MZ12.

[11] Microscope de type Leica DMRXP.

3.3. Analyses sédimentologiques

Les sédiments pris en compte pour cette caractérisation proviennent, comme nous l'avons vu précédemment, de trois profils, à savoir : la partie supérieure de la colonne 7, la partie inférieure de la colonne 14 et la colonne QX-267. Le corpus compte dès lors 21 échantillons, représentatifs de la plupart des couches de la partie nord-est du site. Dans le but de rendre les résultats plus parlants, le numéro attribué à ces prélèvements se réfère à leur position stratigraphique : par exemple « 14-6b » provient de la couche 6b de la colonne 14.

3.3.1. Granulométrie

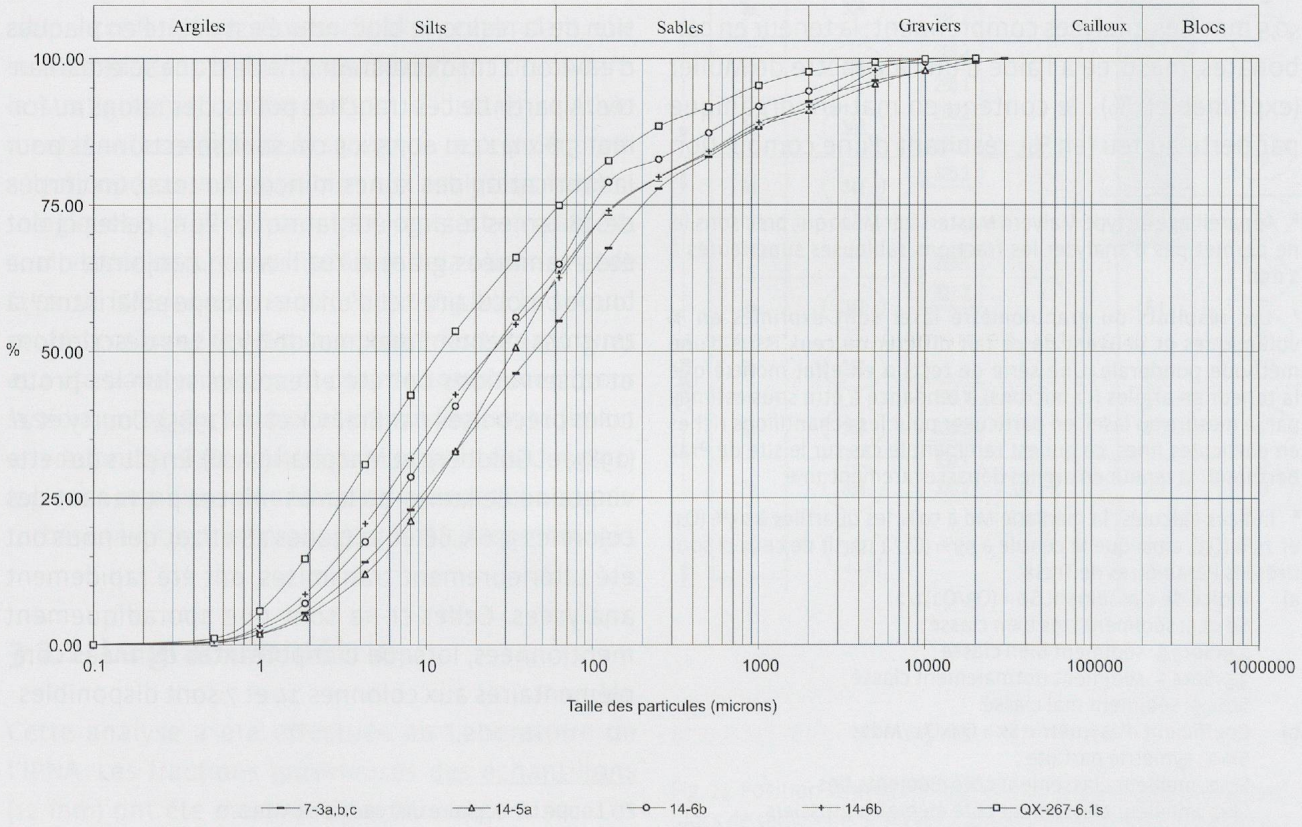
Une subdivision en deux groupes de dépôts peut être faite en fonction de leur degré de classement.

Sédiments classés

Pour sept échantillons, les analyses ont révélé un certain tri des particules. Il s'agit de sédiments fins, composés de *silts sableux* à rares gravillons. Leurs courbes granulométriques, clairement symétriques (0,9<Sk<1,3), sont redressées dans la fraction silteuse principalement, la médiane se situant entre 10 et 50 microns (fig. 25). Avec un indice So compris entre 3,5 et 5,1, leur classement est médiocre, mais tout de même assez marqué pour distinguer ces dépôts du reste du corpus d'échantillons (fig. 26).

Si l'on se réfère à d'autre sites archéologiques de pied de versant que nous avons eu l'occasion d'étudier (Guélat 2010 ; Guélat et Rentzel 2011), ces traits granulométriques indiquent qu'un écoulement d'eau intervient dans la mise en place de ces sédiments : il s'agit de dépôts issus d'un ruissellement diffus, suivant la pente du terrain, et probablement sur courte distance. Un tel processus est inclus au terme plus général de colluvionnement (Lozet et Mathieu 2002). Dans les colonnes 7 et 14,

Fig. 25. Courbes granulométriques des échantillons qui montrant un certain tri des particules, en particulier pour la fraction silteuse. Il s'agit de sédiments fins, composés de silts sableux à rares gravillons.



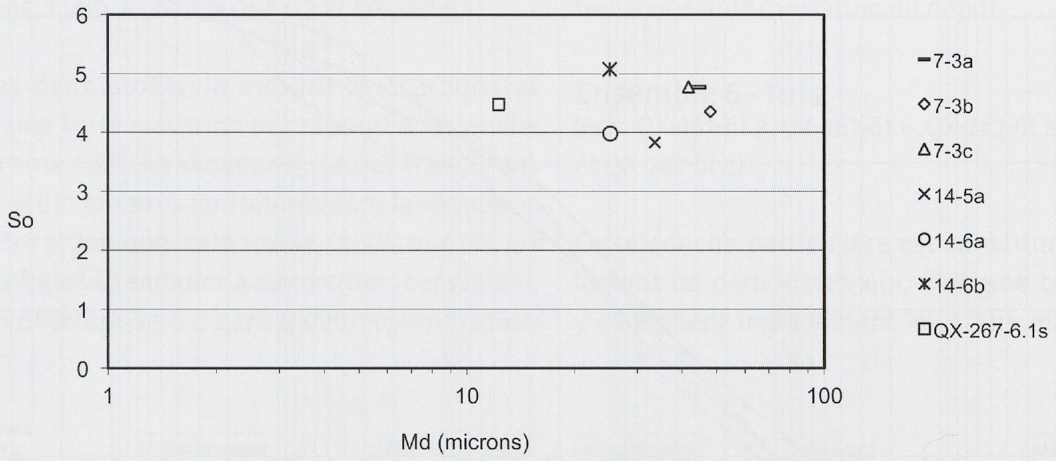


Fig. 26. Représentation de l'indice de classement (So) en fonction de la médiane des échantillons de sédiments classés.

ce mode de dépôt est donc à l'origine des différents horizons de l'ensemble 3, qui ont une courbe identique (éch. 7-3a, 7-3b et 7-3c), de l'ensemble 5 (éch. 14-5a) et de ceux du sommet de l'ensemble 6 (éch. 14-6a et 14-6b). Dans le profil QX-267, le sommet de la couche de limons gris, soit la couche 6.1 (éch. QX-267-6.1sommet), se distingue par une teneur en argiles atteignant 16%, alors qu'elle est comprise entre 5% et 9% dans les autres cas. Localisé dans la partie inférieure de la stratigraphie, ce dépôt particulièrement fin (Md=12,3 microns) ne résulte certainement pas d'une illuviation d'origine pédogénétique, mais plutôt d'une décantation sous une tranche d'eau. Un examen à la loupe binoculaire des résidus de tamis (fraction 0,5-1mm) montre en effet que les concrétions carbonatées y sont relativement abondantes, de même que les fragments de coquilles de mollusques. On y trouve également quelques rares charbons de bois.

Sédiments mal classés

Le reste du corpus analysé, soit quatorze échantillons, ne montre qu'un mauvais classement des particules, avec un indice So supérieur à 6,2. L'éventail des courbes granulométriques est nettement plus large que celui des sédiments précédents, leur médiane étant comprise entre 20 et 660 microns. Plusieurs groupes peuvent être distingués suivant les faciès et la position stratigraphique.

Tout d'abord, nous individualisons trois dépôts limoneux situés dans la partie supérieure des profils (éch. 7-2a.2, QX-267-3 et QX-267-5). Assez semblables, leurs courbes granulométriques sont plutôt rectilignes : on parle d'une distribution logarithmique des particules (fig. 27). Seul le pourcentage en sables fins (entre 63 et 125 microns) montre des variations notables suivant les couches. Après contrôle à la loupe binoculaire des résidus de tamis (fraction 0,5-1 mm), il s'avère que les deux échantillons provenant de la colonne QX-267 sont riches en concrétions carbonatées, probablement remaniées. Ces trois échantillons correspondent certainement à des colluvions.

Les cinq échantillons prélevés dans les tufs du profil QX-267 (éch. QX-267-6t.1, QX-267-6t.3, QX-267-6t.4, QX-267-6t.6 et QX-267-6t.7) montrent chacun des courbes spécifiques, asymétriques, mais de tendance rectiligne également. Nous pouvons raisonnablement nous poser la question de la pertinence d'une analyse granulométrique dans ce type de dépôt : son résultat peut fortement varier en fonction du degré de cimentation. De plus, un examen à la loupe binoculaire des résidus de tamis montre que les apports détritiques (grains minéraux) y sont inexistants, ces dépôts s'étant formés par incrustation de différents supports, le plus souvent des végétaux.

Puis, les dépôts à la base de la colonne QX-267 (éch. QX-267-6.1base, QX-267-6.3 et QX-267-7.1),

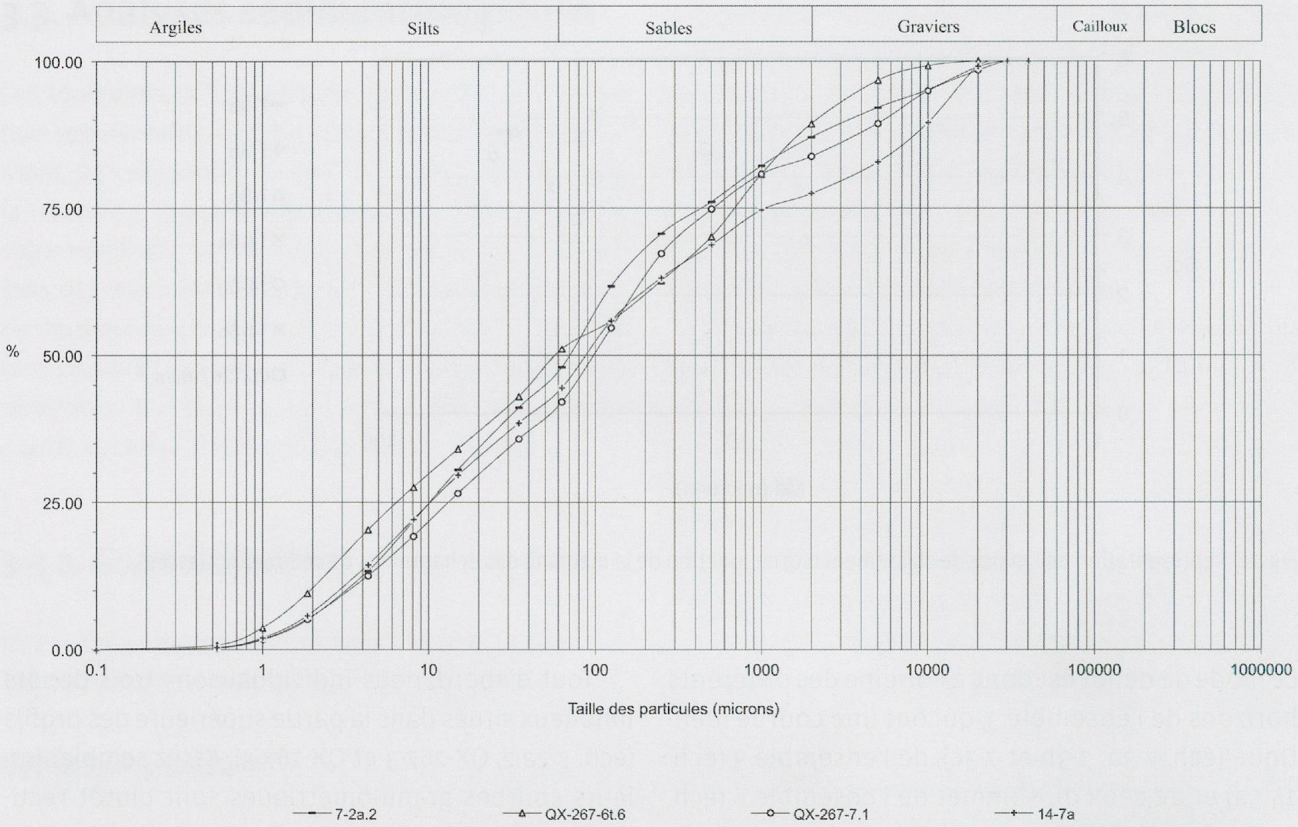


Fig. 27. Courbes granulométriques représentatives des échantillons de sédiments mal classés. La distribution logarithmique des particules indique qu'il s'agit de colluvions

bien que plus riches en particules fines, ont des courbes très disparates. L'examen des sables grossiers à la loupe binoculaire montre que la teneur en concrétions carbonatées diminue vers le bas de la séquence et que les particules minérogènes constituent la grande majorité de ces dépôts, voire la totalité pour la couche 7.1. Contrairement aux échantillons de tufs, l'analyse granulométrique se justifie donc pour ces trois échantillons. Enfin, les couches localisées à la base de la colonne 14 (éch.14-6c, 14-7a et 14-7b) montrent des courbes semblables, peu redressées, avec une teneur en gravillons atteignant 25%. La distribution logarithmique des particules indique qu'il s'agit dans la plupart des cas de colluvions.

3.3.2. Géochimie

Comme pour la granulométrie, cette analyse concerne le profil compilé des colonnes 7 et 14, ainsi que la colonne QX-267 (fig. 28 et annexe 1). Rappelons que ces tests sont réalisés sur la matrice des sédiments, plus précisément les fractions inférieures à 0.5 mm. De bas en haut du profil, il est possible de résumer l'évolution des paramètres en cinq niveaux.

Ensemble 7 - « Limons orange »
(éch. 14-7b, 14-7a et QX-267-7.1)

Dans le profil QX-267, la teneur en carbonates est minimale dans cet ensemble de base de la séquence (4%) : celle-ci a certainement subi une dissolution consécutive à une pédogenèse. Dans la colonne 14, ce même taux se trouve également à un minimum, mais loin plus loin d'être nul (21 à 36%) : la micromorphologie révèle que des concrétions carbonatées de type oncoïde sont déjà apparentes dans cet ensemble. Nous notons également, au sein des deux colonnes, un léger contenu en matière organique (2 à 3%).

Ensemble 6 - « Limons gris »

(éch. 14-6c, 14-6b, 14-6a, QX-267-6.3 et QX-267-6.1)

Dans les deux profils, la mesure des carbonates montre une forte élévation par rapport à la couche sous-jacente (54% en moyenne), ce qui traduit des apports sédimentaires non altérés dans la séquence. La matière organique reste stable, tandis que le taux de phosphates a tendance à augmenter ; cependant, la valeur obtenue (1,5 u.c. dans QX-267) est trop faible pour pouvoir attribuer sans équivoque cette élévation à une anthropisation du dépôt.

Ensemble 6 - Tufs

(éch. QX-267-6t.7, QX-267-6t.6, QX-267-6t.4, QX-267-6t.3 et QX-267-6t.1)

Cette couche particulière est constituée essentiellement de carbonates qui, d'origine biochimique, y atteignent logiquement leur taux maximal (92%

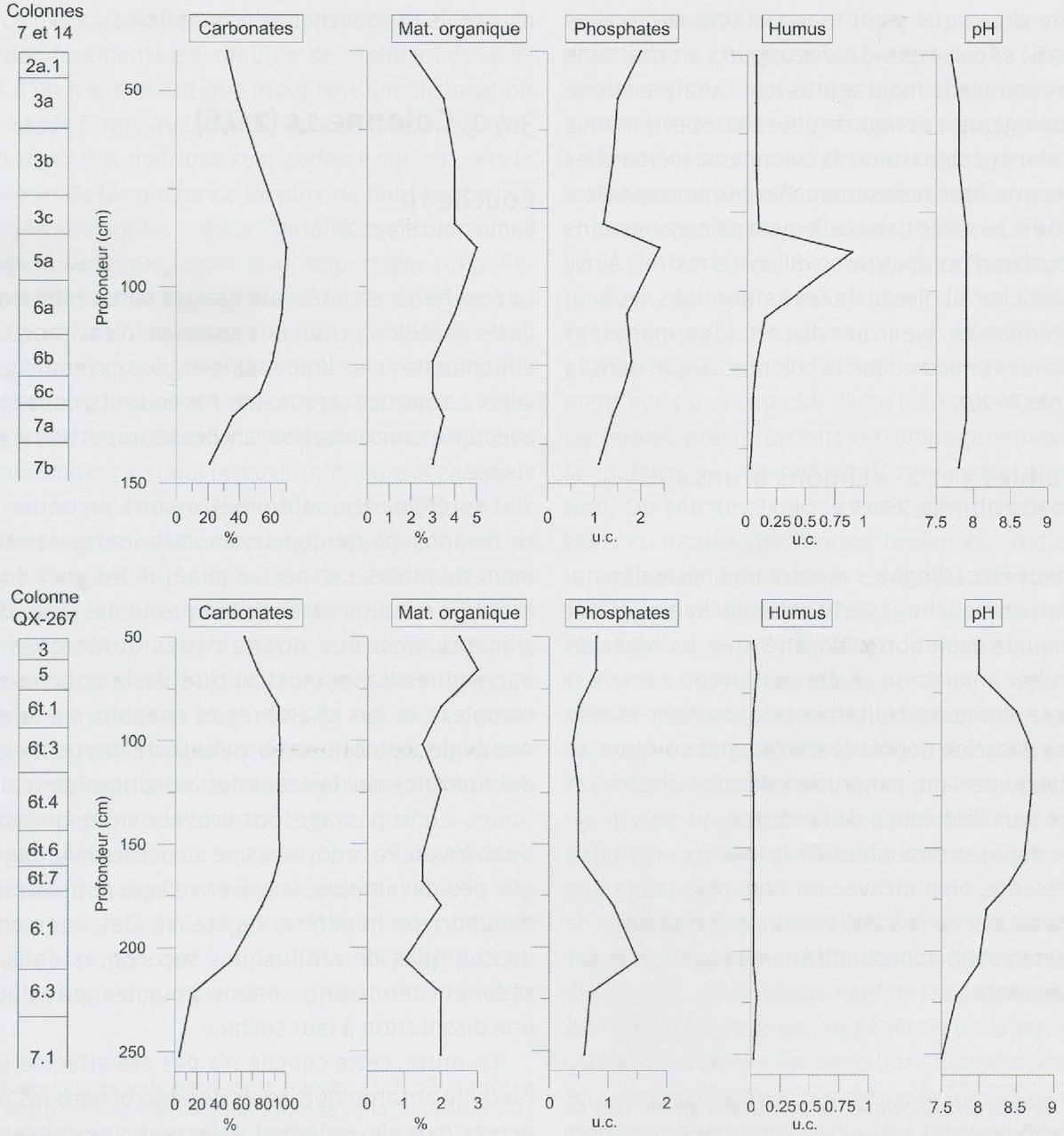


Fig. 28. Analyses géochimiques des colonnes 7 et 14 (en haut), QX-267 (en bas).

en moyenne). Les autres paramètres ne montrent aucune tendance notable, les valeurs obtenues correspondant au « bruit de fond » naturel.

Ensemble 5 - « Limons noirs »
(éch. 14-5a et QX-267-5)

La teneur en carbonates reste élevée dans cet ensemble (environ 70%), elle atteint même le maximum de la colonne 14. Nous pouvons en déduire qu'il n'a pas subi d'évolution à l'air libre sur une longue période. Dans les deux profils considérés, le taux de matière organique y est maximal (5%, respectivement 3%) et correspond à des apports en charbons de bois comme le montre plus loin l'analyse micromorphologique. Les taux de phosphates et d'humus confirment ce signal dans la colonne 14, même si les valeurs atteintes restent peu élevées par rapport à ce qu'il est possible habituellement de mesurer dans des couches d'occupation en milieu terrestre[12]. Ainsi, il apparaît, qu'au niveau de ces limons noirs, les activités humaines, bien que discrètes, se marquent relativement mieux dans la colonne 14 que dans la colonne QX-267.

Ensembles 3 et 2 - « Limons bruns »
(éch. 7-3c, 7-3b, 7-3a, 7-2a.2 et QX-267-3)

La teneur en carbonates montre une nette diminution entre la couche 3c (66%) et la couche 3a (39%) et indique une évolution pédogénétique, marquée en particulier à partir de ce dernier niveau. La valeur mesurée demeure toutefois relativement élevée pour ce genre de dépôts : ceci traduit d'une part les apports du versant, par érosion de sols calcaires, et d'autre part l'influence de la source, qui se signale encore dans ces ensembles. De la matière organique est présente, bien qu'avec un taux plus faible que dans la couche 5a (2 à 4%). Les autres paramètres ne montrent aucun impact anthropique particulier sur les sédiments.

Pour conclure, relevons que le pH évolue en domaine basique dans toutes les couches des colonnes 7, 14 et QX-267, soit entre 7,5 et 8,7 (Baize et Girard 1995).

3.4. Analyse micromorphologique

Les résultats de cette analyse sont présentés en parcourant les couches des colonnes 14 et 7 de bas en haut. Les données détaillées de la microscopie se trouvent dans les annexe (annexes 2 et 3) sous forme d'un tableau pour chaque échantillon.

3.4.1. Colonne 14 (z. 46)

Couche 7b
(lame mince 331.2)

La couche 7b est présente dans la partie inférieure de l'échantillon 331 sur une épaisseur d'environ 5 cm. Elle consiste en un limon sablo-argileux avec des gravillons, à matrice carbonatée. Par endroits, des zones avec une concentration argileuse importante est visible.

Les éléments sablonneux sont arrondis et se composent de quartz, de carbonates et rarement de micas. Le spectre minéral des gravillons arrondis est plus varié et comprend des grès, des silicates ainsi que des calcaires oolithiques et micritiques. La microstructure de la couche est complexe et des chambres et chenaux signalent une évidente bioturbation. L'activité des racines et des lombrics, qui laissent des biosphéroïdes calcitiques à leur passage, ont provoqué une porosité de 20 à 25%. Par endroits, une structure microagrégée peu développée laisse envisager la proximité d'un horizon humifère, végétalisé. Des fragments de coquilles de mollusques incorporés dans le sédiment montrent, comme pour les gravillons, une dissolution à leur surface.

En outre, cette couche n'a pas été affectée par l'activité anthropique. Seuls des microcharbons dispersés dans le sédiment attestent une présence humaine dans les environs. Le sédiment de la couche 7b représente donc du matériel fluvio-glaciaire qui,

[12] Sur les sites archéologiques de plaine alluviale, un taux de phosphates dépassant 3 à 4 u.c. indique de manière générale un net apport anthropogénique. Des teneurs supérieures 9 u.c. ont été mesurées dans certaines sépultures riches en fragments osseux (Guélat, à paraître).

après dépôt, a subi une pédogenèse menant à la dissolution partielle des carbonates et à la formation de concentrations argileuses dans la matrice[13].

Couche 7a
(lames minces 331.2, 331.1, 330.2 et 330.1)

Avec une épaisseur de 8 à 10 cm, la couche 7a est constituée dans toute sa puissance d'un limon sabloargileux à matrice carbonatée (planche 1.1,). Sporadiquement, quelques graviers de quartzite y sont inclus. Des fragments de tuf calcaire arrondis, des oncoïdes carbonatés, des biosphéroïdes calcitiques et des fragments de coquille de mollusques revêtus d'un liseré micritique indiquent une dislocation du dépôt formé aux abords de la source. L'augmentation du flux hydrique se manifeste surtout vers le sommet de la couche 7a. De plus, de fines bandes de limons et d'argiles subhorizontales sont intercalées dans le sédiment, signe d'un apport par ruissellement (Bresson et Valentin 1994). En raison d'une bioturbation très marquée, ces bandes ne sont que très localement préservées. Sous la forme de chambres et chenaux, la porosité atteint 15% à 20%. La microscopie permet une subdivision en deux microcouches dénommées 7a.2 pour la partie inférieure et 7a.1 pour la partie supérieure. Les traits pédologiques tels qu'imprégnations ferromanganiques, concentrations d'argiles et précipitation de carbonates dans les vides racinaires sont nettement plus prononcés dans la microcouche 7a.2. Dans la microcouche 7a.1, un accroissement de la fraction grossière telle que sables, oncoïdes et fragments de tuf, ainsi que de très fréquentes coquilles de mollusques, signalent une nette reprise de l'activité hydrique, de manière contemporaine à la formation de la couche.

L'origine de la couche 7a est donc colluviale, avec une variation des flux hydriques pendant la sédimentation. La forte concentration en éléments tufeux et oncoïdes prouve que la source était déjà active. Des indices de pédogenèse se marquent dans toute la couche. Dans la matrice, les carbonates secondaires, micritiques, proviennent des couches supérieures et démontrent la constante humidité du sédiment causée par la proximité de la résurgence.

Couche 6c
(lames minces 330.1, 329.2 et 329.1)

Le colluvionnement se poursuit et mène à la genèse de la couche 6c, d'une épaisseur d'environ 9 cm. L'apport en éléments grossiers est visiblement moins prononcé que dans la couche sous-jacente et le sédiment se constitue dans toute la couche d'un limon compact, sablonneux. La matrice consiste en un silt carbonaté, d'aspect micritique. Les conditions de sédimentation sont similaires à celles de la couche 7a. On constate cependant un enrichissement en composants biogéniques, tout comme en éléments tufeux et autres oncoïdes issus de la source. En outre, l'augmentation du taux de carbonates micritiques dans la matrice est remarquable et permet de postuler une précipitation dans des conditions humides, éventuellement sous une tranche d'eau (Durand *et al.* 2010). De faibles précipitations ferromanganiques dans la matrice pourraient confirmer cette observation. On retrouve dans ce sédiment des concrétions racinaires sparitiques, remaniées, indiquant la présence d'un couvert végétal développé à son sommet. Une bioturbation tardive (racines et lombrics) se manifeste par la microstructure à chambres et chenaux et une porosité moyenne, de 15% à 20%. Toute cette activité biologique explique la faible compacité du sédiment. La pédogenèse est manifeste, mais moins prononcée que dans les couches sous-jacentes. Mis à part quelques microcharbons, aucune autre trace anthropique n'a pu être identifiée.

A l'instar des couches précédentes, la formation de la couche 6c résulte d'un colluvionnement, mais elle signale un ralentissement de la dynamique sédimentaire. L'augmentation générale de la teneur en carbonates indique des conditions humides, voire un écoulement (ruisseau) ou même la formation d'une mare lors d'un débit important de la source. Ceci expliquerait le peu d'importance des phénomènes pédologiques.

[13] Dans la lame mince M74 de la colonne 31 (z. 20), la couche 7b montre une décalcification avancée et la formation plus accentuée d'un horizon argilluvial (BT) que dans la colonne 14. En outre, un fragment d'os arrondi, ainsi que du charbon de bois, tous deux indices d'une activité anthropique à proximité, ont été identifiés dans ce niveau.

Couche 6b
(lame mince 329.1)

La matrice de la couche 6b se compose de carbonates micritiques sablonneux, permettant de postuler une précipitation dans des conditions humides, voire anaérobies. Les éléments tufeux et les oncoïdes bien conservés témoignent d'une genèse dans un rayon très proche ou même *in situ*. Les oncoïdes de type « fluviatile » (Hartkopf-Fröder *et al.* 1989), présents en forte majorité, possèdent une forme concentrique (planche 1.2) et peuvent atteindre jusqu'à 2 cm de diamètre. Si l'on considère les anneaux de croissance micritiques autour de leurs nucléus, leur formation aurait duré 2 à 7 ans (Ilger 2006). On retrouve les fragments de mollusques (planche 1.3) et les biosphéroïdes, en position remaniée. La teneur en microcharbons ainsi qu'en matière organique dégradée est plus élevée par rapport aux couches sous-jacentes. Bien que dans les vides racinaires, des accumulations de spores signalent la proximité de la surface, les indices d'une pédogenèse prononcée ne sont pas présents. Ces différents facteurs expliquent la couleur grise de la couche 6b. Dans sa partie inférieure, la proportion de sables grossiers est plus élevée que dans la partie supérieure, ce qui permet de subdiviser cette couche en deux microcouches, 6b.2 pour la partie inférieure et 6b.1 pour la partie supérieure.

Dans la couche 6b, les conditions sont donc nettement influencées par l'activité de la source. La teneur en carbonates micritiques dans la matrice suggère une genèse du sédiment sous une tranche d'eau. En outre, la quantité d'éléments tufeux et d'oncoïdes non altérés indiquent une formation à proximité immédiate, voire *in situ*, de ces constituants. D'autres indices typiques d'un milieu humide, comme par exemple un granoclassement des particules liées à une décantation, n'ont pas été observés. En outre, les traits pédologiques manquent complètement. On postule ainsi que le dépôt s'est formé grâce à la présence d'un ruisseau ou d'une petite mare. Les microcharbons de bois sont les seuls apports anthropiques montrant une activité humaine dans les proches environs.

Couche 6a
(lame mince 327.2)

La couche 6a correspond à un limon sablonneux à matrice carbonatée micritique, avec quelques gravillons. Les tufs et oncoïdes y sont plus rares que dans la couche sous-jacente, ce qui tend à montrer une réduction du flux hydrique provenant de la source. Le colluvionnement a provoqué une fragmentation des tufs ainsi que le dépôt d'oncoïdes non concentriques, ces derniers devenant plus rares. Le taux de carbonates micritiques signale une sédimentation dans des conditions humides, probablement même en milieu anaérobie. La microstructure à chambres et chenaux, d'une porosité de 15%, est comparable à celle des niveaux sous-jacents. La bioturbation se marque en particulier par des vides racinaires. On retrouve des précipitations ainsi que des nodules ferromanganiques dans le sédiment, probablement générés au cours d'une pédogenèse peu prononcée ayant eu lieu postérieurement. Celle-ci est également responsable de la faible dissolution des éléments carbonatés. La présence humaine se marque dans la couche uniquement sous forme de microcharbons et charbons de bois isolés, intégrés au fond matriciel.

La couche 6a renferme ainsi essentiellement du matériel colluvial et l'apport moins prononcé en composants carbonatés indique une activité de la source en nette diminution. Comme dans les couches 6c et 6b, le taux de carbonates micritiques dans la matrice suggère la poursuite de la sédimentation sous une tranche d'eau. L'influence anthropique n'est discernable que par les microcharbons de bois, qui constituent une sorte de « bruit de fond » dans toutes les couches. Dans une phase tardive, une faible pédogenèse a laissé ses traces dans les sédiments.

Ensemble 5
(lames minces 327.1 et 325.2)

La mise en place de l'ensemble 5 est similaire à celle de la couche 6a (planche 1.4). La seule différence réside dans l'augmentation des apports détritiques carbonatés dans la fraction sableuse. Des intercalations poussiéreuses (silteuse),

subhorizontales, signalent un faible ruissellement. En outre, des concrétions racinaires sparitiques, remaniées, traduisent une surface dénudée, avec un couvert végétal peu important (planche 1.5). Les plages de limons remaniés sont légèrement rubéfiées, suite à un probable passage du feu en surface. En outre, une coquille de mollusque avec une structure modifiée pourrait confirmer cet impact thermique. Dans la partie supérieure de ce même ensemble, aussi bien la structure microagrégée accompagnée d'une bioturbation plus intense, que la dissolution des carbonates et la présence de spores, indiquent une pédogenèse plus prononcée que dans le niveau sous-jacent.

L'activité humaine se marque dans l'ensemble 5 par l'augmentation de la teneur en charbons de bois et en restes organiques dégradés, ainsi que par la présence d'une esquille d'os subarrondie (planche 2.6). Aucune concentration de phosphates n'a pu être observée dans toutes les lames minces observées : de manière générale pour le site de Praz Berthoud, les analyses géochimiques mettent mieux en évidence les traces d'occupation humaine (*cf.* Ensemble 5, p. 42). Le matériel colluvial provient sans doute d'une déstabilisation des sols sur le site et ses alentours proches. L'accroissement du taux de microcharbons et des charbons de bois, qui donnent au sédiment une couleur plus foncée, pourrait signaler un défrichement par brûlis.

3.4.2. Colonne 7 (z. 37)

Couche 3c

(lames minces 325.1[14] et 288.2)

La couche 3c est constituée d'un limon sablonneux à matrice carbonatée, compact, issu du même processus colluvial que la couche 5a. La teneur en sables de quartz est visiblement plus élevée que dans les couches sous-jacentes. En outre, les précipitations ferromanganiques dans le sédiment et au pourtour des vides racinaires sont en augmentation remarquable. Elles sont plus marquées dans la lame mince 288.2 de la colonne 7 et autorisent une subdivision de la couche 3c en 3c.2 (colonne 14 – lame mince 325.2) et 3c.1 (colonne 7 – lame mince 288.2). Une forte dissolution des carbonates, apparente dans les fragments de tufs et dans la matrice traduisent les effets d'une pédogenèse. De même, une structure complexe à chambres et chenaux, ainsi qu'une faible microagrégation et une bioturbation accentuée, suggèrent le développement d'un horizon humifère. Les indices d'une occupation anthropique dans les environs sont uniquement perceptibles par la faible concentration en microcharbons dans la matrice.

La couche 3c a donc été formée dans des conditions comparables aux couches sous-jacentes (matériel colluvial et conditions humides avec précipitations de carbonate micritique). Une diminution de l'activité de la source ou éventuellement le captage de celle-ci par l'homme a permis une évolution sur place des dépôts (dissolution des carbonates et précipitations ferromanganiques).

Couche 3b

(lames minces 288.1 et 286.2)

La formation de la couche 3b, qui est interprétée comme un épandage graveleux d'origine anthropique par les archéologues, ne se différencie guère sous lame mince de celle de la couche 3c. Elle se distingue seulement par une pédogenèse visiblement plus évoluée. Ceci se manifeste par la dissolution des carbonates, la microstructure à chambres et chenaux, localement par une structure microagrégée, par une porosité moyenne à forte (20%-30%) et par des précipitations ferromanganiques dans la matrice. Le sédiment de la couche 3b peut être subdivisé en 3b.2 (lame mince 288.2) et en 3b.1 (lame mince 286.2). Dans la partie inférieure (3b.2), la pédogenèse est peu prononcée. Dans la partie supérieure (3b.1), une composante colluviale grossière, riche en sables quartzeux et en éléments altérés, témoigne d'un apport du versant plus puissant, ou d'origine anthropique : à ce même endroit en effet, un fragment de sol intact, mais remanié, renferme un niveau de sablons finement lités : celui-ci pourrait provenir d'un niveau tassé par piétinement (planche 2.7,).

[14] La lame mince 325.1, qui recoupe la couche 3c, provient de la colonne 14 (z.46).

Couche 3a
(lames minces 286.1 et 285.2)

La pédogenèse se poursuit dans la couche 3a, qui est issue des mêmes processus que les couches sous-jacentes (3c et 3b). L'apport de gravillons et de sables de quartz sont plus prononcés que dans la couche 3b, ce qui signale une intensification du colluvionnement. La microstructure complexe s'exprime par des chambres et chenaux, ainsi que par une microagrégation de la matrice. En outre, conjointement avec la dissolution intense des carbonates et les effets de la bioturbation, une porosité élevée, atteignant 40%, caractérisent cette couche. Des croûtes manganiques au pourtour des vides racinaires ainsi que des précipitations d'oxydes ferromanganiques dans la matrice résultent d'une évolution sur place prolongée (planche 2.8). Les indices d'une activité anthropique ne sont détectables que par la présence de quelques microcharbons dans la matrice. La couche 3a s'est donc mise en place dans des conditions hydromorphes et, suite à une pédogenèse, une altération de ses composants a eu lieu.

Couche 2a
(lames minces 285.2, 285.1, 283.2 et 283.1)

La formation de la couche 2a s'explique de la même manière que les couches sous-jacentes. En comparaison avec les autres niveaux, le sédiment de cette couche hétérogène présente une composante nettement plus détritique car elle contient des gravillons de nature siliceuse (grès, quartzite), alors que les fragments tufeux sont en diminution. En outre, dans sa partie supérieure, la proportion de sables de quartz est dominante. La micromorphologie permet une subdivision en trois différentes couches (2a.3 à 2a.1). Dans la partie inférieure (2a.3), la matrice possède une structure à chambres et chenaux de porosité moyenne à forte (20%-30%), ainsi que par endroits une structure microagrégée. Vers le haut (2a.1), le sédiment devient plus compact avec une porosité moyenne (15% à 20%) et la matrice faiblement argileuse. Les indices d'une pédogenèse sont présents dans les couches 2a.3 et 2a.2, mais clairement moins prononcés que dans 2a.1, où des précipitations ferromanganiques forment des encroûtements autour des pores. La bioturbation se marque par des vides racinaires et des biosphéroïdes calcitiques in situ, ce qui implique une certaine aération de la couche ainsi qu'une dissolution des carbonates. Des intercalations poussiéreuses (silto-argileuses) subhorizontales signalent des ruissellements dans les microcouches 2a.2 et 2a.1. Dans cette dernière, l'apport colluvial en gravillons grossiers est bien perceptible et parle en faveur d'une amplification de l'écoulement superficiel : celle-ci suggère un probable défrichement du paysage à l'Epoque romaine. Les nombreux microcharbons et charbons de bois attestent une activité anthropique dans les proches environs.

La couche 2a se caractérise pour l'essentiel par une accumulation colluviale provenant des dépôts fluvio-glaciaires du versant. Sa genèse est similaire aux autres couches, bien que l'influence de la source diminue nettement. Le développement de la végétation implique une pédogenèse avec dissolution de carbonate et précipitations ferromanganiques. L'activité anthropique n'est signalée que par des charbons de bois et des microcharbons.

Ensemble 1
(lame mince 283.1)

Cet ensemble superficiel est constitué de matériel colluvial à matrice très compacte, d'une porosité faible (10%). En raison de la pédogenèse progressive, le taux en carbonate est minimal pour la séquence et l'altération des fragments de tuf bien visible. La teneur en charbons de bois augmente par rapport à la couche sous-jacente. Pour plus de détails, voir les données analytiques (annexe 3.4).

3.5. Synthèse

3.5.1. Bilan des analyses

La granulométrie effectuée sur les profils 7, 14 et QX-267 a permis d'identifier deux groupes de sédiments à distribution particulaires très proches. Les couches 3a, 3b, 3c, 5a et 6a présentent ainsi un relatif classement, résultant d'un ruissellement superficiel diffus, alors que le sommet de la couche 6.1 provient

certainement d'une décantation sous une tranche d'eau. Tous les autres dépôts, à distribution logarithmique, sont mal classés. Il s'agit pour la plupart de colluvions, mais aussi de tufs calcaires plus ou moins cimentés. Ces sédiments biochimiques, composés à plus de 90% de carbonates, rendent l'interprétation des résultats granulométriques très délicate, c'est pourquoi nous avons préféré les laisser de côté, dans cette analyse.

La géochimie s'est révélée parlante pour les indices d'occupation humaine, globalement peu marqués dans les deux séquences testées. Elle signale un net impact anthropique dans l'ensemble 5.

Quant à l'analyse micromorphologique, elle indique une dynamique pédosédimentaire assez semblable pour toutes les couches des colonnes 7 et 14. En effet, elles se sont essentiellement mises en place par colluvionnement au sens large, accompagné parallèlement d'un flux hydrique variable, dans des conditions la plupart du temps hydromorphes, qui émanent de la source. Seule la couche 7b ne montre véritablement aucune influence de cette résurgence. La limite des couches souvent diffuse s'explique par une forte activité biologique. Plusieurs générations de bioturbations récentes, mais aussi anciennes, ont homogénéisé les sédiments, ce qui engendre une perte d'information. Ainsi, les éventuels niveaux de circulation ou d'occupation ne sont – avec une rare exception dans la couche 3b – pas préservés. A l'instar de la géochimie, la microscopie n'a permis d'identifier qu'un faible effet de l'occupation humaine sur les sédiments. Seules une teneur élevée en charbons de bois et des traces de feu dans l'ensemble 5, ainsi que certains indices d'aménagement dans la couche 3b, signalent une activité anthropique plus marquée.

3.5.2. Reconstitution des événements

La synthèse des résultats permet, couche après couche, de proposer une reconstitution des principaux épisodes pédosédimentaires sur le site de Praz Berthoud (planche 3).

Ensemble 7

Fait remarquable pour tous les profils analysés, les couches 7b et 7a ne contiennent que relativement peu de carbonates et renferment des concentrations d'argiles dans la masse. Dans les mêmes couches, à la base de la colonne 31 (z. 20), une forte dissolution a d'ailleurs pu être observée sous lame mince, ce qui n'est pas le cas dans la colonne 14[15]. L'ensemble 7 en général a donc subi une pédogenèse évoluée et la couche 7b, du matériel fluvio-glaciaire mal classé et donc probablement remanié, a atteint localement le stade d'un horizon argilluvial BT d'un sol lessivé, suite à un arrêt de sédimentation prolongé. Les carbonates secondaires proviennent des couches sus-jacentes et témoignent des conditions humides qui ont régné après cette ou ces phases d'altération. Dans la colonne 31, on détecte certains composants qui pourraient être d'origine anthropique ; ailleurs, seuls des microcharbons dispersés dans le sédiment signalent une éventuelle présence humaine, mais ceux-ci peuvent aussi provenir d'incendies naturels. Dans la couche 7a, qui correspond dans la colonne QX-267 au remplissage de chenaux d'écoulement incisés dans les couches sous-jacentes, l'apport colluvial se renforce nettement. L'apparition à son sommet de fragments tufeux et d'oncoïdes carbonatés indique que la source commence à s'écouler.

Ensemble 6

La couche 6c résulte elle aussi d'un colluvionnement, de type proximal, mais avec un ralentissement de la dynamique sédimentaire. L'augmentation spectaculaire des carbonates, surtout biochimiques, dans les profils analysés est liée au fonctionnement de la source. Celle-ci a engendré des conditions humides, mais à caractère localement temporaire. Dans la colonne 14, en effet, on remarque que ce niveau est proche d'un horizon végétalisé, peu évolué, nécessitant une émersion. Dans la colonne QX-267, le sommet des limons gris (c. 6.1), de granulométrie particulièrement fine, résulte certainement d'une mise

[15] Ces différences montrent la variabilité locale des phénomènes pédologiques et par conséquent l'importance d'un nombre d'échantillons en rapport avec la grandeur du site.

en place par décantation, sous une tranche d'eau plus permanente.

Dès la couche 6b, les conditions sont encore plus influencées par l'activité de la source, les traits pédologiques étant totalement absents. Dans la colonne 14, la quantité d'éléments tufeux et d'oncoïdes, mais aussi la carbonatation de la matrice montrent que le sédiment s'est déposé dans une tranche d'eau sursaturée. Les sables grossiers observés à sa base indiquent des apports détritiques discrets. Ce dépôt a donc été mis en place par un ruisseau temporaire, respectivement dans une éventuelle mare qui s'étendait jusqu'à la source.

Dans la couche 6a, les composants carbonatés, parfois remaniés, subissent un net recul, indiquant une diminution du débit moyen de la source. Cependant, dans la colonne 14, les carbonates micritiques dans la matrice suggèrent la poursuite de la sédimentation sous une tranche d'eau.

Associés à cet ensemble, dans la colonne QX-267, des tufs calcaires, à degré de cimentation variable, se sont formés par incrustation de débris principalement végétaux, qui indiquent la présence d'un couvert arbustif ou arboréen à ce stade. Enfin, une activité humaine assez distante est enregistrée, uniquement dans la colonne 14, par la présence de microcharbons de bois.

Ensemble 5

Dès l'ensemble 5, la majorité des constituants sont d'origine colluviale. Dans la colonne 14, un impact anthropique est signalé par un pic relatif de certains paramètres géochimiques, alors que dans la colonne QX-267 l'empreinte humaine reste très discrète. L'accroissement de la teneur en charbons, associée à d'autres indices identifiés dans la colonne 14, tels que le passage au feu de certains composants, pourraient signaler un défrichement par brûlis. Les apports colluviaux, comprenant des ruissellements diffus, proviennent sans doute d'une fragilisation des sols, sur le site et ses alentours, due à cette pratique. Enfin, les indices de pédogénèse détectés au sommet de cet ensemble indiquent un ralentissement général de la sédimentation vers la fin de sa mise en place.

Ensemble 3

Apports par colluvionnement, accompagnés de ruissellements superficiels, et relative humidité des lieux caractérisent les conditions de dépôt de la couche 3c dans la colonne 7. Un débit de la source en diminution, ou éventuellement un captage de celle-ci par l'homme, a engendré une évolution sur place de ces sédiments et un net abaissement de la teneur globale en carbonates. La couche 3b ne se différencie guère de la couche 3c. Cependant, dans sa partie supérieure, un apport marqué en éléments plus grossiers ainsi que d'éventuelles traces de circulation pourraient confirmer qu'il s'agit d'un épandage d'origine anthropique. La couche 3a s'inscrit en continuité dans cette séquence colluviale, mais une évolution pédogénétique signale un net ralentissement de la sédimentation. L'occupation humaine ne s'y marque pour ainsi dire pas.

Ensembles 2 et 1

La genèse de la couche 2a a lieu par accumulation colluviale en provenance du versant. Dans sa partie sommitale en effet, une composante en gravillons grossiers issus du substrat fluvio-glaciaire traduit une intensification du ruissellement, les sols du versant ayant tendance à profondément s'éroder. A l'instar des nombreux charbons de bois présents dans la couche, on pourrait mettre ce phénomène en relation avec une phase de déboisement. L'influence de la source diminue nettement. Une pédogenèse, avec développement d'un couvert végétal, affecte la couche 2a après son dépôt. Dans l'ensemble 1, également d'origine colluviale, l'altération des constituants témoigne de l'intensification des processus pédogénétiques et indique la surface du sol actuel.