

Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande
Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise
Band: 154 (2014)

Artikel: L'habitat alpin de Gamsen (Valais, Suisse) : 2. Le contexte géologique :
histoire sédimentaire d'un Piémont en contexte intra-alpin, du
Tardiglaciaire à l'actuel
Autor: Moulin, Bernard / Guélat, Michel / Rentzel, Philippe
Kapitel: IX: Micromorphologie : étude des sols enfouis
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-835634>

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: 15.04.2026

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

CHAPITRE IX

MICROMORPHOLOGIE: ÉTUDE DES SOLS ENFOUIS

9.1 INTRODUCTION

9.1.1 CADRE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'intégration de la géoarchéologie à la recherche sur les sites archéologiques de Gamsen fut envisagée dès la conception du projet. L'analyse micromorphologique (voir encadré ci-après) devait porter sur l'interprétation de certains vestiges archéologiques complexes, en amenant à une meilleure compréhension des processus de formation des couches anthropiques²⁷⁰. Les résultats de ces analyses sont présentés ailleurs²⁷¹.

Comme c'est l'usage dans cette démarche, nous avons inclu les sédiments naturels sous-jacents aux structures archéologiques lors des prélèvements d'échantillons systématiques ou plus ciblés²⁷². Étant donné qu'une étude géologique approfondie a été menée en parallèle par Bernard Moulin, nos investigations ont concerné plus particulièrement l'aspect pédosédimentaire et sont ainsi venues compléter les observations sédimentologiques (voir chapitre I, pp. 22 sqq.). Autrement dit, la micromorphologie est intervenue dans les problématiques pour lesquelles les méthodes plus classiques avaient atteint leurs limites, notamment lors de l'interaction des processus pédogénétiques.

Concrètement, il s'agissait dans un premier temps de préciser la nature et l'origine des sédiments rougeâtres qui, sur le terrain, apparaissaient à plusieurs endroits dans les coupes stratigraphiques, au sein de la séquence « médiane ». Rappelons que cette dernière comprend les successions de couches postérieures aux dépôts glacio-lacustres, mais antérieures aux occupations protohistoriques (voir chapitre III).

En premier lieu, il s'agissait de déterminer la cause de cette rubéfaction: est-elle l'effet d'un passage du feu, suite à un incendie? Ou d'une oxydation naturelle, pédologique, voire d'une combinaison des deux phénomènes?

Il fallait en outre définir si ces horizons étaient en place ou s'ils avaient subi des remaniements semblables à ceux des formations colluviales, sur le versant. L'interprétation de ces sédiments particuliers débouchait donc sur des questions d'ordre paléo-environnemental: si une partie de ces horizons rubéfiés témoignait bien de pédogenèses anciennes, quelle était leur signification dans le cadre de l'évolution du coteau de Gamsen, à l'Holocène?

²⁷⁰ Voir aussi BUTZER 1982 ou COURTY *et al.* 1994.

²⁷¹ BENKERT et EPINEY-NICOUD 2005, pp. 51 sqq.

²⁷² Voir aussi à ce sujet COURTY *et al.* 1989.

Pour répondre à ces questions, nous avons prélevé des échantillons dans les profils où la séquence médiane était relativement bien développée, dans trois zones distinctes, à savoir Waldmatte-ouest (ou BW-ouest), Waldmatte-est (ou BW-est) et Bildacker (BB) (fig. 126). Nous présentons ci-dessous les observations de terrain et les résultats des analyses de laboratoire réalisées sur ces trois secteurs, en accordant une importance particulière à la description microscopique et à l'interprétation des dépôts qui en découle.

Qu'est-ce que la micromorphologie ?

- *La micromorphologie est une technique issue de la pédologie pour étudier la genèse et le fonctionnement des sols grâce à un examen microscopique. Par opposition aux méthodes classiquement utilisées en sédimentologie, son point fort réside dans la conservation de l'organisation spatiale du sédiment, ce qui permet une hiérarchisation dans le temps des processus génétiques.*
- *Pratiquement, sur le terrain, des blocs orientés sont prélevés dans les couches à analyser, ceci à partir de coupes stratigraphiques. Puis ces échantillons non perturbés sont positionnés sur un relevé de profil accompagné d'un descriptif.*
- *Au laboratoire, les blocs de sédiment sont tout d'abord séchés, puis indurés sous vide par de la résine synthétique liquide. Après polymérisation complète de cette dernière, le bloc induré est débité à l'aide d'une scie diamantée dans le but d'obtenir des tranches de la couche à analyser. Celles-ci sont ensuite amincies jusqu'à 30 microns à l'aide d'une rectifieuse. Une fois montées et recouvertes, ces lames minces sont prêtes pour la microscopie.*

9.1.2 CHRONIQUE DES TRAVAUX

Toute étude micromorphologique débute nécessairement par des travaux sur le terrain. Concernant la problématique paléopédologique de Gamsen, ces derniers se sont déroulés en trois étapes. La première eut lieu en novembre 1991, à Waldmatte-ouest, dans deux tranchées ouvertes à la pelle mécanique où plusieurs échantillons furent prélevés dans des niveaux interprétés comme des sols enfouis. En avril de l'année suivante, des relevés accompagnés de prélèvements micromorphologiques furent effectués sur le site de Bildacker, dans des sondages de prospection archéologique et pour des motifs identiques. Notre dernière intervention, en juillet 1993, se déroula dans une tranchée localisée à Waldmatte-est, dans laquelle sont également apparus plusieurs sols fossiles.

Simultanément à ces travaux, la fabrication des lames minces²⁷³ fut mise en route selon le mode opératoire défini dans l'encadré ci-dessus. Un corpus d'une quarantaine de lames au total, comprenant également des échantillons comparatifs de sols actuels, fut ainsi créé pour cette problématique. Toutes ces lames ont été analysées selon les techniques de microscopie optique mises aimablement à notre disposition par le Laboratoire de Géoarchéologie du Séminaire de Préhistoire de l'Université de Bâle.

Suite à une analyse microscopique préliminaire, en 1993, un rapport présentant les premiers résultats de cette recherche fut rédigé²⁷⁴. En septembre 1997, de nouvelles données sur le thème des sols enfouis de Gamsen, comparées avec celles du site de Sierre-Creux de Chippis, firent l'objet d'une publication²⁷⁵. Depuis la parution de cet article, nous avons repris l'intégralité du problème en consultant en parallèle la littérature spécialisée.

²⁷³ Nous remercions C. Blanchet, du Centre de Géomorphologie de Caen, et Th. Beckmann, de Braunschweig, qui se sont chargés de cette opération.

²⁷⁴ GUÉLAT *et al.* 1993, pp. 25-47.

²⁷⁵ GUÉLAT *et al.* 1998.

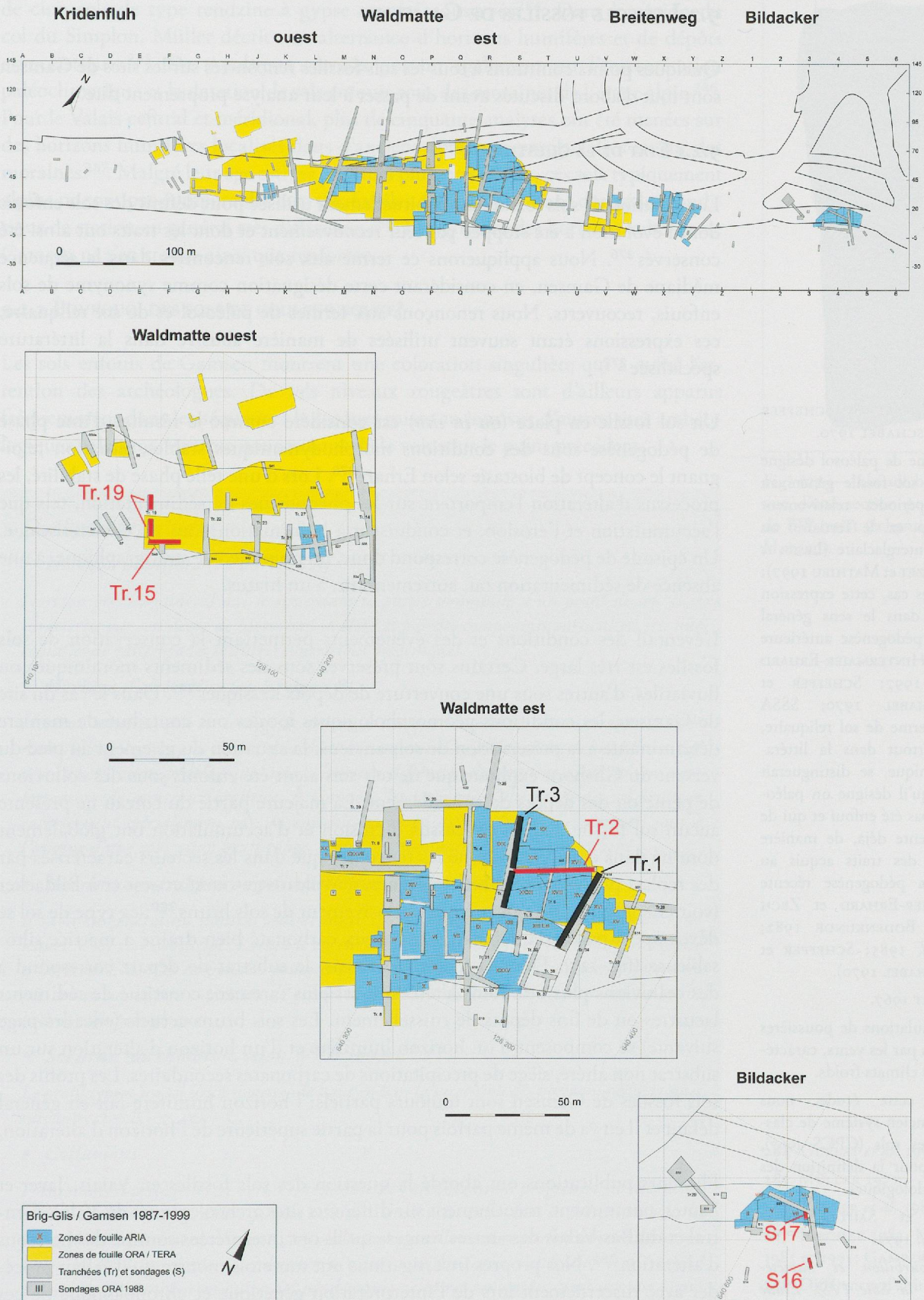


Fig. 126 — Plan général des sites de Brig-Glis / Gamsen (en haut) et plans de situation des profils analysés (sites de Bildacker, Waldmatte-est et Waldmatte-ouest).

9.2 LES SOLS FOSSILES DE GAMSEN

Quelques points communs à tous les sols fossiles rencontrés sur les sites de Gamsen sont tout d'abord discutés avant de passer à leur analyse proprement dite.

9.2.1 ÉTAT DE LA QUESTION

L'appellation de sols fossiles est habituellement utilisée pour définir des sols enfouis dont l'évolution a été stoppée par leur recouvrement et dont les traits ont ainsi été conservés²⁷⁶. Nous appliquerons ce terme aux sols rencontrés dans la séquence médiane de Gamsen, en considérant cette désignation comme synonyme de sols enfouis, recouverts. Nous renonçons aux termes de paléosol et de sol reliquaire, ces expressions étant souvent utilisées de manière abusive dans la littérature spécialisée²⁷⁷.

Un sol fossile en place (ou *in situ*) est considéré comme le résultat d'une phase de pédogenèse sous des conditions morphodynamiques stables, situation rejoignant le concept de biostasie selon Erhart²⁷⁸. Lors d'une telle phase de stabilité, les processus d'altération l'emportent sur les phénomènes de sédimentation, tels que l'accumulation et l'érosion, et conduisent à la formation d'un sol caractéristique. Un épisode de pédogenèse correspond donc, du point de vue stratigraphique, à une absence de sédimentation ou, autrement dit, à un hiatus.

L'éventail des conditions et des événements permettant la conservation de sols fossiles est très large. Certains sont préservés sous des sédiments morainiques ou fluviaux, d'autres sous une couverture de dépôts loessiques²⁷⁹. Dans le cas du site de Gamsen, les conditions géomorphologiques locales ont contribué de manière déterminante à la préservation de sols anciens: la situation du gisement au pied du versant du Glishorn explique que de tels sols aient été enfouis sous des colluvions de pente ou des dépôts de ruissellement. La majeure partie du coteau ne présente aucun sol fossile, car les processus d'érosion et d'accumulation ont globalement dominé dans ces zones. On ne les rencontre que dans les secteurs caractérisés par des replats plus ou moins bien marqués, à Waldmatte-ouest et -est et à Bildacker (voir chapitre IV). Il s'agit presque exclusivement de sols bruns²⁸⁰: ce type de sol se développe à partir d'un substrat graveleux carbonaté bien drainé à matrice silto-sableuse (fig. 127). Dans la majorité des cas, le substrat de départ correspond à des colluvions plus ou moins altérées; il est plus rarement constitué de sédiments lacustres ou de fins dépôts de ruissellement. Les sols bruns actuels (encadré page suivante) se composent d'un horizon humifère et d'un horizon d'altération sur un substrat non altéré, siège de précipitations de carbonates secondaires. Les profils des sols fossiles de Gamsen sont toujours partiels: l'horizon humifère fait en général défaut et il en va de même parfois pour la partie supérieure de l'horizon d'altération.

Plusieurs publications ont abordé la question des sols fossiles en Valais. Jayet et Sauter, notamment, mentionnent sur différents sites archéologiques du Valais Central et du Bas-Valais des «terres rouges» qu'ils ont interprétées comme des horizons d'altération²⁸¹. Nos propres investigations ont toutefois montré qu'il fallait procéder avec discernement lors de l'interprétation génétique et chronologique de ces niveaux rubéfiés. Les analyses réalisées à Sion-Tourbillon ont par exemple attesté la présence d'un sol brun pré-néolithique sur du loess²⁸². Ces quelques cas bien documentés sont plutôt rares, car la plupart des sols décrits en Valais se résument à des sols peu épais²⁸³ développés sur des dépôts de pente ou des sédiments morainiques. Ainsi, sur le cône de déjection de Sierre-Creux de Chippis, les horizons humifères

²⁷⁶ LESER *et al.* 1985; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1970.

²⁷⁷ Le terme de paléosol désigne souvent un sol fossile généré au cours de périodes relativement anciennes (p. ex. le Tertiaire) ou durant un interglaciaire (LESER *et al.* 1985; LOZET et MATHIEU 1997); dans d'autres cas, cette expression est utilisée dans le sens général pour toute pédogenèse antérieure à l'actuelle (HINTERMAIER-ERHARD et ZECH 1997; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1970; SSSA 1996). Le terme de sol reliquaire, employé surtout dans la littérature germanique, se distinguerait par le fait qu'il désigne un paléosol qui n'a pas été enfoui et qui de ce fait présente déjà, de manière dominante, des traits acquis au cours de la pédogenèse récente (HINTERMAIER-ERHARD et ZECH 1997; AG BODENKUNDE 1982; LESER *et al.* 1985; SCHEFFER et SCHACHTSCHABEL 1970).

²⁷⁸ ERHART 1967.

²⁷⁹ Accumulations de poussières transportées par les vents, caractéristiques des climats froids.

²⁸⁰ Dans cette étude, nous utilisons l'ancien système de classification des sols (CPCS 1967), y compris pour la définition des horizons pédologiques.

²⁸¹ JAYET et SAUTER 1953; SAUTER *et al.* 1971.

²⁸² Sion-Tourbillon et Savièse-Château de la Soie (VS). *Étude micromorphologique et minéralogique*. (Michel Guélat, rapport non publié, 9 p., 1995). Pour la description des trouvailles archéologiques, voir MÜLLER 1995.

²⁸³ Soit à des profils de type A-C.

de cinq sols de type rendzine à gypse ont été conservés²⁸⁴. Dans la région du col du Simplon, Müller décrit une alternance d'horizons humifères et de dépôts cryoclastiques²⁸⁵. De nombreux travaux portent également sur l'interprétation paléoclimatique et la datation de sols enfouis sous des moraines de l'étage alpin²⁸⁶. Pour le Valais central et méridional, plus de cinquante analyses ont été menées sur des horizons humifères localisés dans d'anciens domaines proglaciaires ou sur des moraines²⁸⁷. Malgré leur âge estimé parfois à plusieurs siècles, ces sols typiquement alpins ne sont pas comparables aux sols fossiles de Gamsen, étant donné les conditions de station en général très différentes²⁸⁸. L'originalité des horizons rubéfiés de Gamsen ne s'en trouve ainsi que renforcée.

9.2.2 POURQUOI DES SOLS DE COULEUR ROUGE?

Les sols enfouis de Gamsen montrent une coloration singulière qui a attiré l'attention des archéologues. De tels niveaux rougeâtres sont d'ailleurs apparus fréquemment dans les séquences holocènes mises au jour sur d'autres sites archéologiques valaisans, comme nous venons de le voir sous le point précédent.

Quelques définitions

- **Horizon humifère (ou horizon A)**

Horizon organo-minéral qui se situe dans la partie sommitale d'un profil de sol. Il se caractérise par son degré de bioturbation élevé et par des composants particuliers tels que coquilles de gastéropodes et autres concrétions biogéniques.

- **Horizon d'altération (ou horizon B)**

Horizon minéral, qui est le siège de processus tels que l'altération de minéraux, la libération d'oxy-hydroxydes de fer et la décarbonatation. Ces phénomènes se traduisent par une structuration pédologique, une coloration différente du substrat ainsi qu'une néoformation de minéraux argileux. À Gamsen, les horizons d'altération des sols bruns se caractérisent spécialement par un enrichissement en oxydes de fer. Ces derniers sont à l'origine d'une coloration brun-rouge, d'où la dénomination de sol brun rubéfié.

- **Horizon minéral peu ou pas atteint par l'altération (ou horizon C)**

Il s'agit en général du substrat sédimentaire (p. ex. dépôts torrentiels ou colluvions) sur lequel le sol s'est développé. Lorsqu'il est enrichi secondairement en carbonates, on parle d'horizon Cca. Ces carbonates peuvent précipiter dans la matrice, autour d'anciennes racines ou sur la face inférieure de grains minéraux, sous forme de revêtements finement lités appelés pendeloques.

- **Sol brun (ou cambisol, selon WRB 2007)²⁸⁹**

Le profil type d'un sol brun montre, de haut en bas, la succession des horizons pédologiques suivante: A – B – (Cca) – C.

- **Colluvions**

Formations superficielles de versant, résultant de l'accumulation progressive de sédiments altérés ou de roches meubles. Sur les sites de Gamsen, les colluvions se présentent sous la forme d'un dépôt hétérométrique, sablo-silteux à gravillons, avec parfois une tendance au litage des éléments grossiers, ces derniers se trouvant à des degrés d'altération et d'éroussé divers. Ils contiennent en outre des pendeloques calcaires remaniées ainsi que des charbons de bois. Deux types ont été distingués: d'une part, les colluvions grises à composants carbonatés peu altérés et d'autre part des colluvions de couleur brun-rougeâtre, pauvre en carbonates. Ce second type est issu principalement de l'érosion des sols dans le versant, c'est pourquoi on parle de pédosédiments.

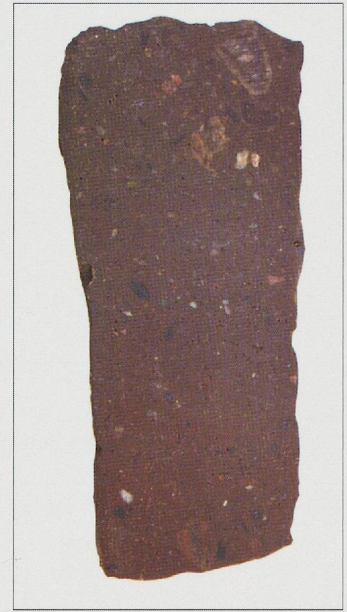


Fig. 127 — Un sol brun rubéfié: vue d'une section polie du sol 2 de BW-ouest (échantillon GM38). H. 14 cm.

²⁸⁴ GUÉLAT *et al.* 1998.

²⁸⁵ MÜLLER 1977.

²⁸⁶ FURRER *et al.* 1987.

²⁸⁷ BIRCHER 1982; HOLZHAUSER 1985 et 1995; GAMPER 1985.

²⁸⁸ Différences d'altitude, de substrat, d'exposition et de végétation.

²⁸⁹ IUSS Working Group WRB 2007. Word Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil resources Reports N°103 FAO, Rome.

Pour aborder le thème de la couleur des sols, il est nécessaire de définir au préalable le terme de rubéfaction qui recouvre différents concepts dans la littérature spécialisée. Nous l'utilisons pour notre part sous son acception courante en archéologie, à savoir l'apparition de la couleur rouge, c'est-à-dire d'une teinte des sédiments qui, dans la charte Munsell, se situe dans les gammes 7,5YR à 5YR (et plus rouge)²⁹⁰. Cette définition n'implique aucun processus génétique car la rubéfaction peut avoir des origines diverses. Dans les secteurs de Waldmatte-ouest et de Bildacker, les séquences de versant ont révélé des horizons B enterrés de teinte rouge la plus prononcée, soit 5YR, tandis qu'à Waldmatte-est, dans la succession stratigraphique la plus complète, ceux-ci ne dépassent pas la gamme 7,5YR.

Sous climat tempéré, la rubéfaction dans les sols est un processus complexe dû à la transformation des oxydes de fer, ceux-ci existant sous plusieurs types minéraux. Dans un article synthétique, Schwertmann définit les relations qui existent entre oxydes de fer, couleur des sols et pédoenvironnement²⁹¹. Selon cet auteur, des colorations atteignant les gammes de couleur de 7,5-5YR et plus rouge indiquent la présence d'hématite (Fe_2O_3), un minéral qui se caractérise par une trace rouge²⁹². Guenat a analysé les horizons rubéfiés, de couleur 5YR, apparaissant localement dans les sols sur moraine du Jura vaudois: ceux-ci contiennent effectivement de l'hématite sous une forme cristallisée, alors que les autres horizons, ainsi que la moraine, en sont dépourvus²⁹³. Selon ces mêmes auteurs, plusieurs facteurs favorisent l'apparition de la rubéfaction dans les sols:

- un matériau parental à forte teneur en fer et possédant une perméabilité élevée; ce substrat doit en outre contenir suffisamment de carbonates pour maintenir le pH proche de la neutralité;
- un climat de type plutôt contrasté, avec des phases de dessiccation totale en période estivale;
- une position topographique assurant un bon drainage des profils.

Géographiquement, ces conditions sont généralement rattachées au pourtour méditerranéen et aux environnements tropicaux, mais avec des données stationnelles particulières, elles peuvent également survenir dans les régions tempérées²⁹⁴.

Le site de Gamsen-Waldmatte entre précisément dans cette dernière catégorie (voir chapitre 1, pp. 13 sqq.). Les différents fragments de roches qu'on y rencontre, tels que micaschistes, calcschistes et schistes gris ont un spectre minéralogique engendrant une abondance du fer²⁹⁵. Dans ces matériaux sablo-graveleux, très filtrants, le pH oscille aux environs de 7,5. Le climat local de type continental, avec des pluies annuelles modestes²⁹⁶, se caractérise par des saisons contrastées, favorisant l'humectation-déshydratation des profils. Enfin, la position topographique du gisement, dominant la plaine alluviale du Rhône, assure un parfait drainage. Bien qu'aucune analyse des formes du fer n'ait été réalisée sur les sols enfouis de Waldmatte, nous supposons que ces derniers renferment de l'hématite, tout particulièrement les sols de la gamme 5YR dans les profils de Waldmatte-ouest et de Bildacker.

Dans les horizons rubéfiés, l'hématite coexiste avec la goethite (FeOOH), oxyde de fer beaucoup plus courant dans les climats tempérés, donnant à la plupart des sols de ces régions une teinte brun-jaune (de 2,5Y à 7,5YR). À ce propos, les sols actuels de Gamsen ont précisément une couleur qui s'insère dans la gamme 10YR, soit brun-jaune à brun foncé.

290 MUNSELL COLOR CO. 1992.

291 SCHWERTMANN 1993.

292 Couleur du minéral réduit en poudre. Le moyen le plus courant de déterminer cette trace consiste à faire un trait avec le minéral sur une plaque de porcelaine blanche.

293 GUENAT 1987.

294 BRESSON 1976; SCHWERTMANN *et al.* 1982.

295 Mentionnons à titre d'exemple l'apparition du stilpnomélane qui est un phyllosilicate typique des sédiments riches en fer et manganèse, de métamorphisme faible (DEER *et al.* 1992).

296 730mm selon GUTERSOHN 1961.

Comment dès lors expliquer que les sols enfouis, sur ce même site, montrent une rubéfaction? On peut admettre que les composés organiques masquent en partie les oxydes de fer contenus dans les sols actuels, mais un autre paramètre important entre ici en ligne de compte: c'est le facteur temps. Schwertmann²⁹⁷ explique la transformation des sols jaunes en sols rouges par un taux de libération du fer plus grand à un stade avancé du développement du sol, ce qui conduit à la formation d'hématite²⁹⁸. Des sols rouges, ayant évolué sur de longues périodes, peuvent ainsi apparaître dans des régions où seuls des sols brun-jaune se développent actuellement. Dans le cas de Waldmatte, les séquences pédosédimentaires montrent que dès l'âge du Fer, vers 600 av. J.-C., les profils ont été constamment rechargés en carbonates (par exemple par des alluvions torrentielles), processus qui inhibe l'évolution de la rubéfaction.

Pour clore cette discussion, précisons encore que la rubéfaction apparaissant dans certaines couches n'est pas toujours due à un processus d'évolution sur place des sédiments. Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, cette coloration peut être héritée à partir de sols fossiles érodés dans le versant et accumulés en bas de pente sous forme de colluvions: il s'agit dans ce cas précis de pédosédiments et non de sols développés *in situ*. La rubéfaction peut aussi résulter d'un passage du feu à la surface du sol au cours d'un épisode d'incendie. Cet événement se détecte aisément sous lame mince par l'apparition conjuguée de différents indices: grains minéraux rubéfiés²⁹⁹ à partir de leur pourtour avec, dans le cas des calcschistes, de la calcite transformée en chaux; charbons de bois abondants, racines carbonisées.

Soulignons enfin qu'à Brig, par opposition à d'autres sites archéologiques valaisans³⁰⁰, on n'assiste à aucun héritage direct à partir d'une formation géologique ou roche-mère qui recèlerait à l'origine la pigmentation rougeâtre.

9.3 ANALYSE MICROMORPHOLOGIQUE

Rappelons que des sols enfouis sont apparus à trois endroits différents sur le gisement de Gamsen:

- à Waldmatte-ouest, dans des dépôts coiffant les témoins tardiglaciaires;
- à Waldmatte-est, sous un cône torrentiel édifié durant les périodes protohistorique et historique;
- à Bildacker, au-dessus de diverses formations du Tardiglaciaire et de l'Holocène ancien.

La séquence de Waldmatte-est, qui est la plus complète, constitue par conséquent le profil de référence pour notre étude. Les séquences de Waldmatte-ouest et de Bildacker, moins développées, permettent d'établir d'intéressantes comparaisons.

9.3.1 WALDMATTE-EST

9.3.1.1 Présentation³⁰¹

Dans la partie distale du cône torrentiel est (domaine morphosédimentaire C, voir p. 23), plusieurs tranchées ouvertes à la pelle mécanique ont révélé l'existence de sols fossiles intercalés dans la séquence médiane, en dessous des couches protohistoriques (voir chapitre III). Il s'agit des tranchées Tr.1, Tr.2 et Tr.3, mais il faut souligner que seule Tr.2, comprenant plus précisément les coupes t2a et t2b³⁰², a fait l'objet de prélèvements pour la micromorphologie (fig. 128). La tranchée Tr.3, directement adjacente à Tr.2, a permis de compléter la succession stratigraphique qui sert de support général à notre approche. La tranchée Tr.1³⁰³ intervient quant à elle au niveau des éléments de datation (fig. 129).

²⁹⁷ SCHWERTMANN 1993.

²⁹⁸ Par déshydratation de ferrihydrite ($\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), un autre type d'oxyde de fer.

²⁹⁹ D'après SCHWERTMANN 1993, ceci résulte d'une transformation par le feu de la goethite, en présence de matière organique et avec un apport limité en oxygène, qui génère ainsi de la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), un oxyde de fer de couleur 2.5YR-5YR.

³⁰⁰ Par exemple Collombey-Barmaz (GUÉLAT *et al.* 1995).

³⁰¹ Pour mémoire, les éléments distingués sont les suivants: d'une part, les phases de pédogenèse (PED) correspondant à des arrêts de sédimentation; d'autre part, les phases de mise en place de sédiments qui sont de différents types: coulée boueuse (CB), colluvionnement (COL), écroulement (EB), ruissellement (RUS) et alluvionnement torrentiel (TOR).

³⁰² t2b correspond à une nouvelle vision de la stratigraphie obtenue après recul de la coupe t2a.

³⁰³ Située à une trentaine de mètres à l'est, cette tranchée livre une séquence holocène corrélable à celle des tranchées Tr.2 et Tr.3, ainsi que des informations pour la chronologie absolue (voir chapitre III).

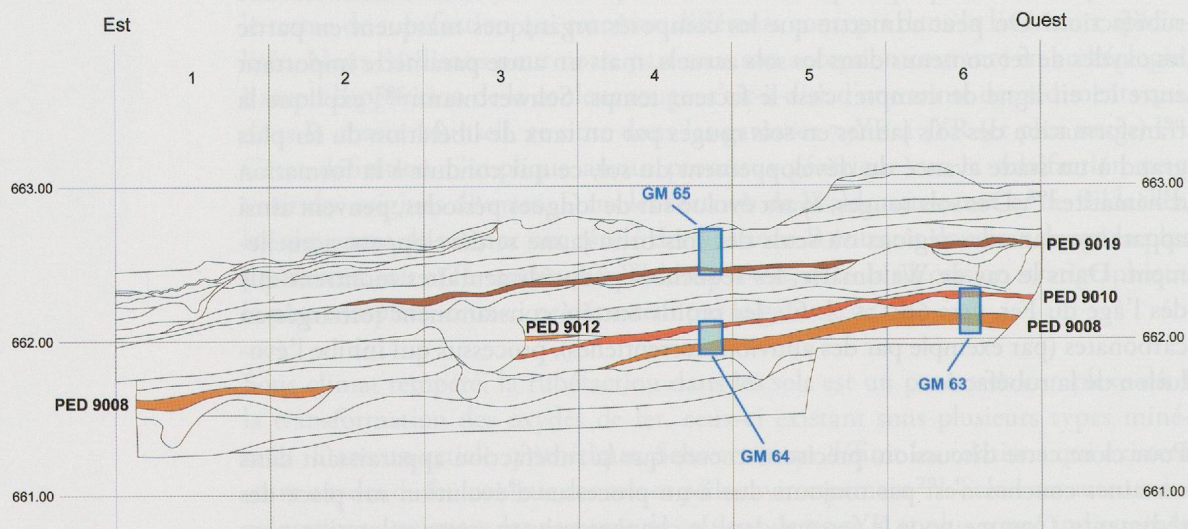


Fig. 128 — Waldmatte-est, coupe stratigraphique t2b (Tr.2), avec les quatre sols enfouis et l'emplacement des échantillons micromorphologiques. Pour la localisation de la coupe, voir Fig. 1.

Chronologie	Événements	Tr.1 / Tr. 2 / Tr. 3 - Unités de terrain (UT)				
		t1w	t2a	t2b	t3a	t3b
1 ^{er} âge du Fer	HABITAT					
	COL9022	40, 96, 120, 121, 122	111, 111b, 111j, 136	15, 16, 17c	32b, 56b, 64, 75b	5, 5A, 5B
	TOR9021	123	137, 137b	14	33, 67a, 67b, 68	49
	COL9020	124	111c	13	34, 65	6, 15
	TOR9025	125				
	PED9019	126	138, 141, 149	12	39	7
2456-2050 BC	t1w/126a COL9018		144		40	7A, 7C
2872-2488 BC	t1w/127 RUS9017		139, 140, 142, 145	10, 11	37	7B
	INC9016		148	9c		
	CB9015		143, 143b, 147	9a, 9b	38, 41, 42, 66, 70	8, 8A
	TOR9013		150	7, 8	69, 71	22, 23, 24
	INC9014				48, 49	18
	PED9012			6c	46, 72a	16, 16A
	CDG9011				47	17, 19, 20
	TOR9024			6b	73	21
	PED9010			6a	43, 44, 50, 72b, 72ab	9, 9A
	COL9023			5		
	TOR9009				74	26, 26B
6072-5759 BC	PED9008	130a, 130b		4b	72, 72c	
6416-6063 BC	t3a/76 RUS9007	131	152	4a		25
	TOR9006 TOR9003	132, 133, 134			45, 452, 3b	10, 10A
	PED9005					
	TOR9004					
	CDG2002	135	153	1		14, 14A
Tardiglaciaire	EB9001	34, 100				

Fig. 129 — Waldmatte-est, tableau de synthèse de la séquence antérieure aux habitats: coupes t1w (Tr.1), t2a-t2b (Tr.2) et t3a-t3b (Tr.3), d'après la fig. 58, pp. 98-99.

Événement	Micromorphologie	Interprétation
HABITAT	Événement absent dans les échantillons.	Niveau d'occupation du 1er âge du Fer.
COL9022	Sables silteux à gravillons, brun foncé, assez poreux (20%). Nombreux éléments brûlés, avec une tendance au litage. Charbons de bois abondants.	Colluvions de sols reprenant entre autres des dépôts post-incendie. Pédosédiments.
TOR9021	Événement absent dans les échantillons.	–
COL9020	Sables silteux riches en gravillons, brunâtres, à forte porosité (25%). Grains minéraux peu altérés, rarement brûlés. Matrice carbonatée, avec des enrobements de grains colloïdaux. Rares charbons de bois. Contact supérieur érosif.	Colluvions reprenant des sols et roches-mères, en amont dans la pente, de type pédosédiments.
PED9019	Sables silteux à gravillons, mal classés, brunâtres (7,5 YR 3/2), sans litage apparent, à porosité assez faible (10%). Grains calcitiques et micacés nettement altérés. Matrice exempte de carbonate. Charbons de bois épars, plus abondants au contact supérieur, qui est de type érosif.	Horizon d'altération peu épais, faiblement évolué, tronqué au sommet par érosion. Sol 1 de BW-est.
COL9018	Sables gravillonneux, dans matrice silteuse brunâtre, assez poreux, avec grains minéraux à différents stades d'altération. Plusieurs phases d'illuviation de carbonates. Charbons de bois.	Colluvions riches en charbons de bois.
RUS9017	Événement absent dans les échantillons.	–
INC9016	Événement absent dans les échantillons.	–
CB9015	Sables riches en graviers grisâtres, mal classés, de porosité moyenne (20%). Éléments en général peu corrodés. Charbons de bois épars. Carbonates secondaires bien développés.	Colluvions riches en graviers, peu ou pas altérés.
TOR9013	Sables gravillonneux gris foncé, bien classés, à tendance au litage, de porosité élevée (30%) et de microstructure à entassement de grains. Éléments en partie altérés. Charbons de bois émoussés. Contact inférieur érosif, avec reprise du sédiment sous-jacent.	Dépôt de ruissellement torrentiel.
INC9014	Silts sableux à gravillons, brun foncé (7,5 YR 3/2), assez poreux (15%), très bioturbés. Grains minéraux parfois brûlés, avec carbonates un peu corrodés. Abondants débris organiques brûlés. Matrice ponctuée de microcharbons, grains revêtus de colloïdes. Charbons de bois abondants (5%).	Base d'un horizon humifère avec traces de feu, érodé au sommet. Sol 2 de BW-est, incendié.
PED9012		
TOR9024	Sables silteux, sans litage apparent, poreux (25%), à grains minéraux en partie brûlés. Contact inférieur érosif, souligné par des gravillons. Charbons de bois arrondis.	Dépôt de ruissellement local, très mince.
PED9010	Silts limoneux à rares gravillons, brun foncé (7,5 YR 3/2), assez poreux (15%), très bioturbés. Grains minéraux généralement altérés. Pigmentation de la masse par des oxydes de fer. Rares carbonates secondaires. Charbons de bois abondants (5%).	Horizon d'altération sur colluvions, à évolution peu poussée. Tronqué au sommet. Sol 3 de BW-est.
COL9023	Sables silteux à gravillons lités, d'aspect panaché (brun-gris 10YR3/4). Porosité 20%. Altération des grains peu marquée. Carbonates illuviaux bien développés (hyporevêtements et pendeloques). Repose sur un contact d'érosion.	Colluvions remaniant des formations peu pédogénisées.
PED9008	Sables silteux à gravillons, brun foncé (7,5 YR 3/2), à faible porosité, très bioturbés, à microstructure en chenaux et chambres. Les grains minéraux sont altérés, surtout vers le sommet où se trouvent des fragments organiques; dans la matrice les éléments calcitiques sont en voie de dissolution complète. Carbonates secondaires, racinaires et, vers le sommet, enrobement des grains par des colloïdes brunâtres. Rares charbons de bois roulés.	Horizon d'altération assez faiblement marqué, juste sous-jacent à l'horizon humifère. Erodé au sommet. Sol 4 de BW-est.
RUS9007	Sables silteux à gravillons, brun-gris (10YR 3/2), à litage apparent.	Dépôt de ruissellement.

Fig. 130 — Waldmatte-est: résultats de l'analyse micromorphologique de la séquence de la tranchée Tr.2.

9.3.1.2 *La tranchée Tr.2: aperçu stratigraphique*

Dans cette tranchée d'une trentaine de mètres de longueur (coupes t2a à t2e) et approfondie sur une dizaine de mètres (coupe t2b), la succession des couches de la séquence médiane atteint une puissance de 1m environ. Elle s'insère entre des dépôts de gravité de l'Holocène ancien et des remblais attribuables au premier âge du Fer. Les sols, au nombre de quatre³⁰⁴, ont été répertoriés sur le terrain essentiellement grâce à leur coloration brun-rouge (5YR-7.5YR3/2); nous les avons dénommés de haut en bas «sol 1 à sol 4 de BW-est». Développés sur substrat silto-sableux de teinte originale gris olive (10YR 3/2), ces sols ont une épaisseur maximale de 30cm. Leur limite inférieure, graduelle, évoque une évolution sur place des dépôts, tandis que leur contact supérieur, très net, traduit plutôt une ablation.

9.3.1.3 *Micromorphologie*

Le tableau de la fig. 130 présente les principaux résultats de l'analyse micromorphologique ciblée sur les sols de la tranchée Tr.2. Dans la colonne de gauche figurent la succession des événements pédosédimentaires exprimés dans la coupe t2b uniquement, qui permet d'établir les liens avec l'étude géologique globale du site (fig. 129). Ces événements sont rappelés entre parenthèses dans le texte ci-après.

Caractères communs

A l'exception du sol 2 de BW-est (PED9012), mieux exprimé dans la tranchée Tr.3, les sols fossiles comprennent un horizon B d'altération. Ces horizons se développent sur du sédiment relativement fin en regard de la granulométrie globale des dépôts et leur porosité est en général plus faible (10-15%) que celle des autres formations. Ils renferment de nets indices de colonisation par la végétation et la pédofaune, tels que terriers, débris organiques, racines calcifiées et nodules ferromanganiques. Leur degré d'évolution semble en outre moins avancé que ceux de la séquence de Waldmatte-ouest et de Bildacker: d'une part, les grains minéraux, bien qu'altérés, contiennent encore un peu de calcite; d'autre part, les enrobements d'oxydes de fer autour de ces grains sont plus discrets, ce qui pourrait expliquer la teinte un peu moins rouge des sols de Waldmatte-est, en comparaison des horizons rubéfiés des deux autres zones (fig. 131).

Le sol 4 de BW-est

Situé vers la base du profil, ce sol se compose uniquement d'un horizon B (PED9008) développé sur des dépôts de ruissellement (RUS9007). Vers son sommet, l'apparition à l'échelle microscopique de fragments de matière organique, présente également sous forme de fins revêtements de grains, indique la proximité d'un horizon humifère (fig. 132); celui-ci a cependant disparu, suite à une érosion peut-être en relation avec un épisode torrentiel enregistré en Tr.3 uniquement (TOR9009). Les carbonates illuviaux, développés principalement en hyporevêtements autour des pores, indiquent une colonisation secondaire par des racines provenant des niveaux supérieurs. On en déduit que le sol 4 de BW-est résulte d'une seule phase de pédogenèse qui a été interrompue par un épisode d'érosion, avant l'accumulation des dépôts colluviaux qui le recouvrent.

³⁰⁴ Un cinquième sol plus ancien (sol 5 de BW-est) a été repéré dans la tranchée Tr.3 mais n'est pas abordé ici car il n'a fait l'objet d'aucune analyse micromorphologique.

Le sol 3 de BW-est

Assez semblable au précédent, ce sol correspond à un horizon B d'altération (PED9010) généré sur des colluvions (COL9023) montrant une accumulation de carbonates secondaires (horizon C_{ca}). À l'instar du sol 4, sa limite supérieure, abrupte, indique une troncature d'érosion résultant d'un épisode torrentiel, responsable également de la mise en place d'un mince niveau de sables (TOR9024). Cet apport minéralogène, peu altéré, a stoppé l'évolution du sol 3.

Le sol 2 de BW-est

Sur ce revêtement sableux va se développer un sol humifère, dont seule la base est conservée (PED9012). En réalité, il semble que ce sol soit mieux exprimé vers l'ouest, comme en témoigne la tranchée Tr.3, dans laquelle malheureusement aucun échantillon n'a été prélevé. Le fait marquant concernant cet horizon réside dans l'abondance des charbons de bois associée à l'oxydation périphérique des particules minérales, qui comprennent des fragments calcitiques transformés en chaux: ces indices témoignent incontestablement d'un passage du feu à la surface du sol 2 de BW-est (fig. 131). Cet épisode d'incendie (INC9014) précède la mise en place de dépôts torrentiels (TOR9013) ayant érodé la partie sommitale de ce sol humifère.

Le sol 1 de BW-est

S'individualisant dans la partie sommitale de la séquence, ce sol consiste à nouveau essentiellement en un horizon B, mais peu évolué cette fois (PED9019). Il est généré à partir de colluvions (COL9018) mises en place après des phases de ruissellement (RUS9017) et d'incendie (INC9016) coiffant d'épaisses coulées boueuses (CB9015). À l'échelle microscopique, on décèle par ailleurs dans ces colluvions plusieurs générations de carbonates secondaires, qui forment un horizon C_{ca}. Erodé au sommet, le sol 1 de BW-est est recouvert d'une formation colluviale (COL9020) qui, sous lame mince, présente des différences notables avec un sol développé in situ: il s'agit en fait de dépôts provenant du démantèlement des sols localisés en amont dans la pente, additionnés de particules peu altérées issues des roches-mères. Leur contact supérieur, de type érosif, voit latéralement s'insérer un épisode torrentiel (TOR9021). Au-dessus de cette limite abrupte se trouvent des colluvions assez comparables, mais qui renferment des grains minéraux brûlés et d'abondants charbons de bois (COL9022). En plus des reprises successives des sols et des substrats, des dépôts post-incendie participent donc également à leur genèse. Cette mise en place par étapes s'est déroulée avant celle des couches du Premier âge du Fer qui terminent la séquence (HABITAT).

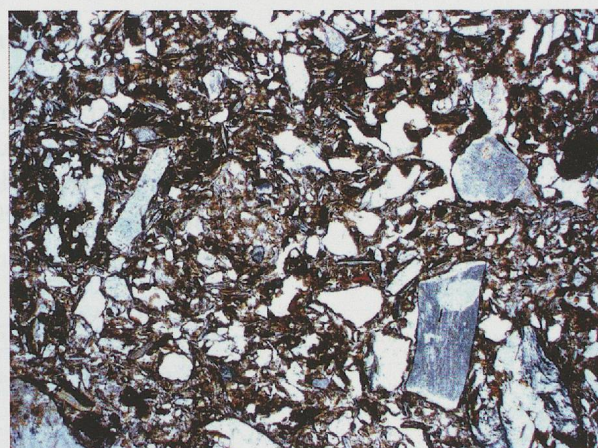


Fig. 131 — Vue sous microscope de l'horizon B rubéfié du sol 2 de BW-ouest (échantillon GM37, lumière analysée, largeur: 4,5 mm).

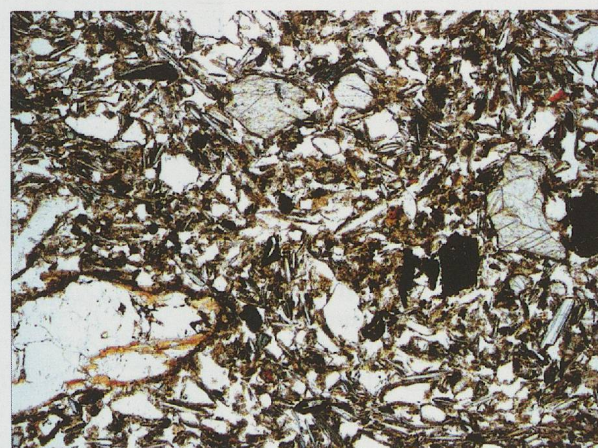


Fig. 132 — Vue sous microscope de l'horizon humifère du sol 4 de BW-est (échantillon GM64, lumière analysée, largeur: 2,25 mm).

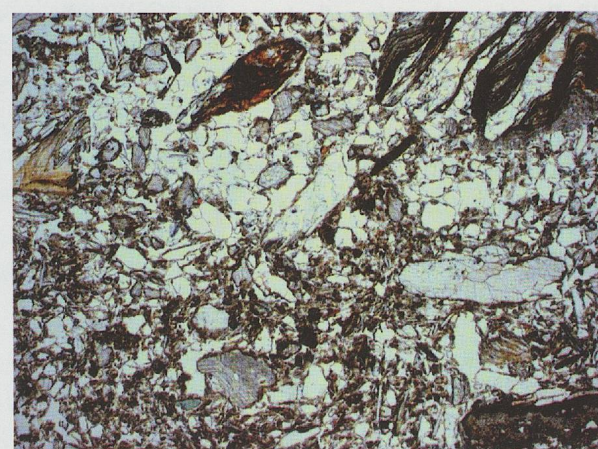


Fig. 133 — Vue sous microscope de l'horizon humifère à traces de feu du sol 2 de BW-est (échantillon GM63, lumière analysée, largeur: 4,4 mm).

9.3.1.4 Synthèse partielle: succession des événements

Cette interprétation phénoménologique de la séquence compilée de Waldmatte-est se fonde sur les résultats de l'étude micromorphologique, complétés par des observations de terrain dans le cas des unités non analysées (désignées par un astérisque; voir aussi fig. 129)³⁰⁵.

- **RUS9007** *Mise en place de dépôts sablo-silteux issus d'un ruissellement superficiel dans la pente. Deux dates radiocarbones sont disponibles pour la période englobant cet événement (voir chap. IV, pp. 94 sqq.): 6416-6063 BC cal. 2σ³⁰⁶ et 6072-5759 BC cal. 2σ³⁰⁷.*
- **PED9008** *Suite à une fixation par un couvert végétal forestier, un sol brun (= sol 4 de BW-est) se développe sur ces sédiments. Il s'agit du premier épisode de pédogenèse bien enregistré dans la séquence, suffisamment long pour que l'horizon B de ce sol acquière une légère rubéfaction.*
- **TOR9009*** *Suite à une ablation peut-être en relation avec un événement torrentiel enregistré surtout vers l'ouest du secteur, la partie sommitale de ce sol est érodée.*
- **COL9023** *Consécutivement à cet épisode, des formations colluviales mobilisant des terrains peu altérés se mettent en place.*
- **PED9010** *Le versant reprend un profil d'équilibre et la végétation le colonise à nouveau: ceci permet le développement d'un sol brun faiblement rubéfié (= sol 3 de BW-est).*
- **TOR9024** *Suite à un ruissellement superficiel, les horizons supérieurs de ce deuxième sol sont érodés et un mince niveau sableux recouvre ce dernier.*
- **CDG9011*** *Latéralement, à l'ouest du secteur, ce ruissellement est suivi par une coulée de débris.*
- **PED9012** *Après stabilisation, la pédogenèse affecte ces apports du versant, menant à la formation d'un sol humifère peu épais (= sol 2 de BW-est).*
- **INC9014** *Episode d'incendie: passage du feu à la surface de ce sol peu évolué.*
- **TOR9013** *Erosion, puis recouvrement du sol 2 suite à un ruissellement torrentiel.*
- **CB9015** *Le ruissellement est suivi par le dépôt d'une coulée boueuse.*
- **INC9016*** *Episode d'incendie, daté de 3348-3027 BC cal. 2σ³⁰⁸.*
- **RUS9017*** *Ruissellements localisés.*
- **COL9018** *Mise en place de colluvions renfermant des charbons de bois.*
- **PED9019** *Reconquête de la végétation et développement d'un sol brun sur ces colluvions (= sol 1 de BW-est). Deux datations ¹⁴C obtenues dans la tranchée Tr.1 montrent que cette pédogenèse est postérieure à 2400-2000 BC cal. 2σ; elles proviennent d'une courte séquence de dépôts de pente³⁰⁹ et d'incendie³¹⁰, parallèle aux événements RUS9017 et COL9018 de la tranchée Tr.2, et constituant à cet endroit le substrat de PED9019.*
- **TOR 9025*** *Suite à une ablation peut-être en relation avec un événement torrentiel enregistré surtout vers l'est du secteur, la partie sommitale de ce sol est érodée.*
- **COL9020** *Mise en place de colluvions de type pédosédiments, remaniant en partie des sols situés en amont dans la pente.*
- **TOR9021*** *Erosion puis mise en place localisée de dépôts torrentiels peu épais.*
- **COL9022** *Accumulation en plusieurs étapes de colluvions mobilisant en particulier des dépôts post-incendie.*
- **HABITAT** *Occupation humaine, implantation de l'habitat du Premier âge du Fer.*

³⁰⁵ On remarquera certaines récurrences dans cette succession d'événements. La signification de cette tendance est discutée au chapitre IV.

³⁰⁶ ARC264 (EA56): 7370 ± 90 BP. Branche carbonisée prélevée dans la tranchée Tr.3 (ta/76).

³⁰⁷ ARC265 (EA36): 7070 ± 80 BP. Charbons de bois prélevés dans la tranchée Tr.1, dans le substrat du sol PED9008 (t1w/130a-131).

³⁰⁸ ARC1384 (ES482): 4482 ± 40 BP. Fragment de souche carbonisée prélevée dans la tranchée Tr.2 (t2b/9c).

³⁰⁹ ARC263 (EA35): 4090 ± 70 BP; 2872-2488 BC cal. 2σ. Charbons de bois prélevés dans les couches t1w/127-128.

³¹⁰ ARC510 (EA71): 3800 ± 50 BP; 2456-2050 BC cal. 2σ. Fragment de souche carbonisée (t1w/126a).

9.3.2 WALDMATTE-OUEST

9.3.2.1 Présentation

D'une profondeur maximale de 4m, les sondages Tr.15 et Tr.19 ont été effectués dans la partie occidentale du site de Waldmatte, à l'emplacement d'un replat bien marqué dans le paysage. La séquence médiane, constituée d'une succession pédo-sédimentaire, peut y atteindre 50 cm d'épaisseur par endroits. Nos investigations ont concerné les coupes Stg 575 du sondage Tr.15 et Stg 578/Stg 579 du sondage Tr.19 (fig. 134).

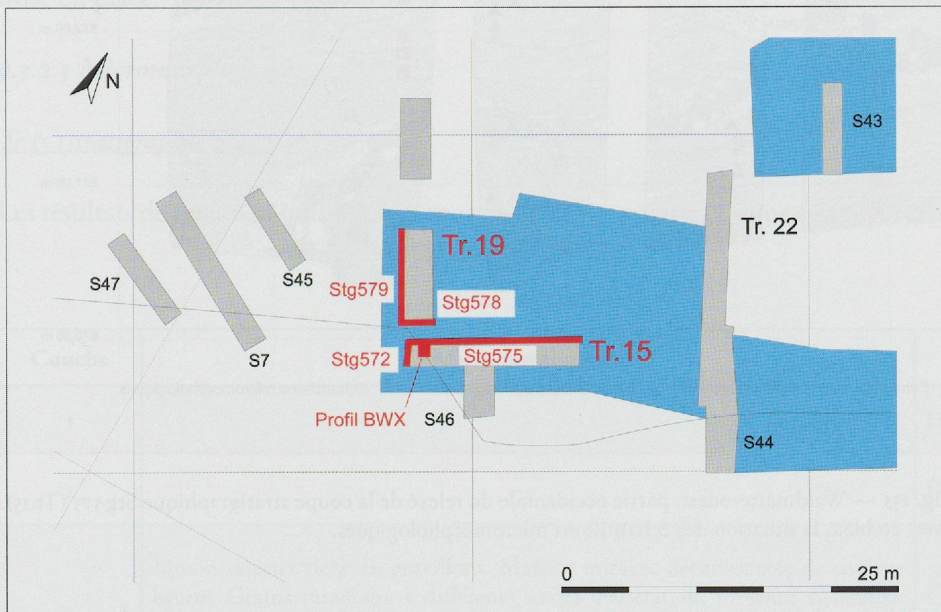


Fig. 134 — Waldmatte-ouest, localisation des coupes de terrain étudiées (voir plan de situation générale, fig. 126).

9.3.2.2 Aperçu stratigraphique

Tr.15 (stratigraphie Stg 575, fig. 135)

La base du profil est constituée de dépôts glacio-lacustres tardiglaciaires montrant d'importantes structures de déformation. Des sédiments graveleux brun olive leur succèdent et passent progressivement vers le haut à un horizon d'altération brun rougeâtre de 35 cm d'épaisseur, dénommé sol 2 de BW-ouest. À cet horizon se superpose une couche de limons bruns à graviers, dont l'épaisseur augmente vers l'aval et qui, dans la partie est du profil, recouvre de manière discordante les sédiments fins du Tardiglaciaire. Ces limons graveleux correspondent à des colluvions. Au sommet de la coupe, on trouve des limons de débordement de bisses d'époque moderne.

Tr.19 (stratigraphies Stg 578- Stg 579, fig. 136)

Les coupes sud et ouest du sondage Tr.19 livrent une information plus détaillée. Un ensemble basal correspond à des paquets de sédiments glacio-lacustres déformés, associés à des dépôts gravitaires à litage chaotique. Dans une petite dépression, un horizon d'altération de couleur rouge foncé assez intense (5YR3/6) est conservé sur cet ensemble. Ce sol inférieur, ou sol 2 de BW-ouest, atteint une épaisseur de 35cm, y compris l'horizon de transition à sa base. Sa limite supérieure correspond à une évidente troncature d'érosion. D'extension latérale plus large, le sol 1 de BW-ouest

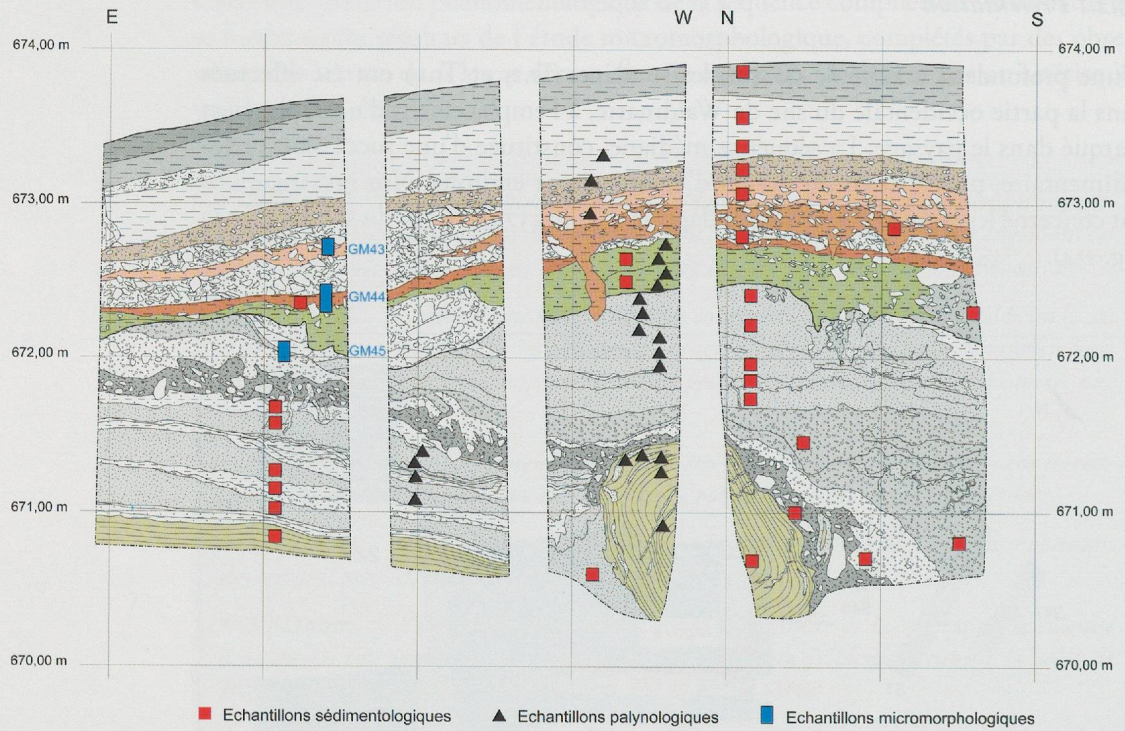


Fig. 135 — Waldmatte-ouest, partie occidentale du relevé de la coupe stratigraphique Stg 575 (Tr.15) avec, en bleu, la situation des échantillons micromorphologiques.

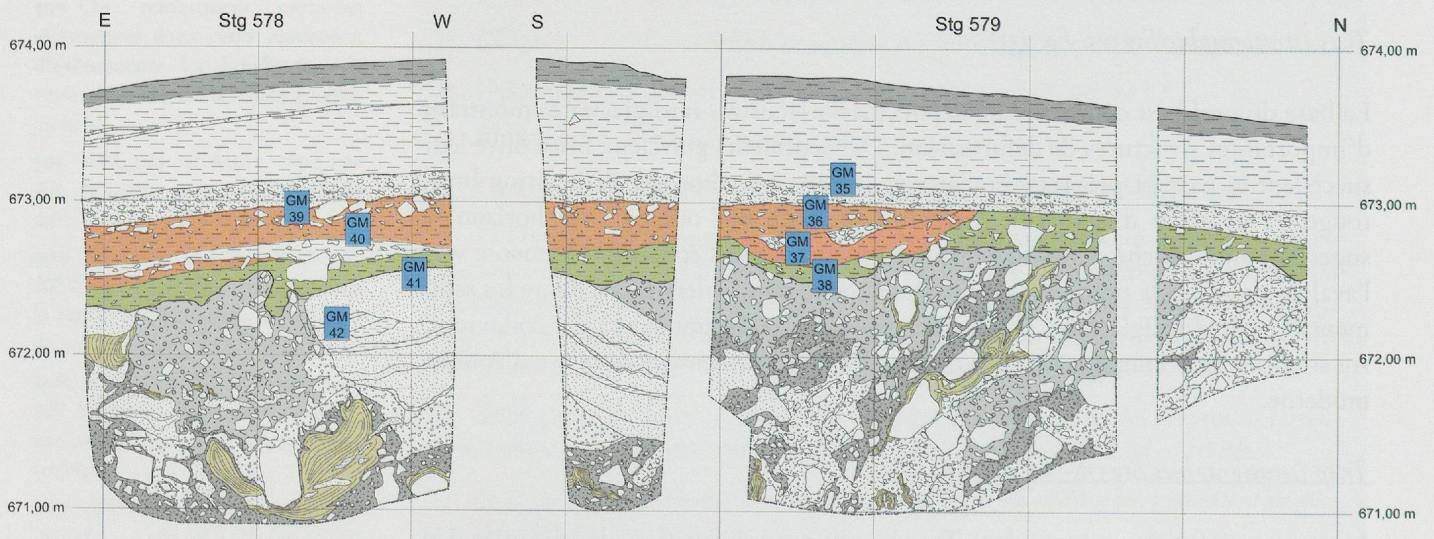


Fig. 136 — Waldmatte-ouest, coupes stratigraphiques Stg 578 et Stg 579 (Tr.19) avec, en bleu, la situation des échantillons micromorphologiques.

présente une partie inférieure brun foncé, tandis que sa partie supérieure s'avère, sous lame mince, d'origine colluviale. Dans ce sondage également, les limons de débordement de bissets et l'horizon humifère actuel constituent les sédiments les plus récents; ils ont contribué à la bonne conservation des sols fossiles.

Dans cette partie du site, l'analyse micromorphologique a concerné le sommet des sédiments tardiglaciaires et bien sûr les sols sus-jacents. Alors que le sondage Tr.15 a révélé une stratigraphie condensée, avec un seul horizon d'altération coiffé par des colluvions plus récentes, les traces de deux pédogenèses *in situ* ont été identifiées dans le sondage Tr.19, sur un substrat glacio-lacustre. Ce dernier recèle des traits micromorphologiques qui parlent en faveur de conditions périglaciaires lors de sa mise en place.

9.3.2.3 Micromorphologie

Tr.15 (stratigraphie Stg 575)

Les résultats de l'examen sous microscope peuvent s'interpréter comme suit (fig. 137).

Couche	Micromorphologie	Interprétation
1	–	Horizon humifère actuel.
2	–	Dépôt de débordement des bissets.
3	Limon sableux riche en gravillons. Matrice micacée décarbonatée de couleur brune. Grains minéraux à différents stades d'altération, présence également de calcschistes. Microstructure à chenaux et chambres, porosité faible (10%). Charbons de bois émoussés.	Colluvions, remaniant la partie sommitale de l'horizon d'altération sous-jacent.
4	Limon sableux à gravillons altérés. Matrice décarbonatée brune à brun rougeâtre (5YR 4/3), riche en micas oxydés. Calcschistes très corrodés, nodules ferrugineux et liseré d'oxydation au pourtour des grains. Porosité faible. Charbons de bois épars.	Horizon d'altération d'un sol brun rubéfié, développé sur des colluvions. Sol 2 de BW-ouest.
5	Sables silteux à gravillons. Matrice carbonatée de couleur brune (10YR 4/3). Microstructure à chenaux et chambres, porosité moyenne. Illuviation de carbonates et bioturbation, suivies d'une illuviation poussiéreuse. Au sommet de la couche, indices d'altération sous forme de zones décarbonatées et de liserés oxydés au pourtour des grains.	Colluvions, horizon de transition.
6	Sables grossiers à gravillons, surmontés d'un silt sableux micacé de couleur gris olive (5Y 5/3). Dans la couche inférieure, les sables sont légèrement arrondis, peu altérés et comprennent des granites, des gneiss, des micaschistes et quelques calcschistes. Microstructure à entassement de grains avec une forte porosité (25%), plus faible dans le silt sus-jacent (10%). Traces de gel sous forme de gravillons redressés, de composants légèrement fracturés et d'une fissuration subparallèle dans les parties limoneuses. Pendeloques calcitiques sur de nombreux grains minéraux. Forte illuviation de carbonates, cimentation partielle du sédiment.	Sédiment glacio-lacustre ayant subi des alternances gel-dégel. Deux phases d'illuviation de carbonates.

Fig. 137 — Waldmatte-ouest, tranchée Tr.15: résumé de l'analyse micromorphologique.

L'échantillon provenant de la partie supérieure de la séquence attribuée au Tardiglaciaire (couche 6), montre des traces de gel fossiles sous forme de graviers redressés, de granites fracturés et d'une structure lamellaire. Une telle microstructure se forme dans un milieu saturé en eau et soumis à une alternance gel-dégel répétée. Le substrat sédimentaire se constitue de sables silteux gris-beige, à gravillons épars, passant vers la base à des sables plus grossiers. Ces dépôts résultent d'une mise en place en milieu lacustre (BW-X, ensemble sédimentaire VI, voir annexe 12). Le diagnostic micromorphologique soulève la question de l'impact du gel-dégel, à savoir dans quelle mesure celui-ci n'est pas responsable des déformations observées dans les dépôts, du moins dans leur partie superficielle (voir chapitre II, pp. 64 sqq.).

Sur le terrain, macroscopiquement, une structure lamellaire était déjà distinguable dans ces limons. L'analyse microscopique a confirmé cette observation puisqu'un réseau de fissures parallèle se développe effectivement dans tout le sédiment silteux (fig. 138). Subhorizontales, inclinées de quelques degrés seulement, ces fissures isolent des lamelles de sédiment d'une épaisseur de 1,5 mm environ. Elles sont revêtues de carbonates secondaires et des concrétions calcitiques racinaires viennent s'y loger. Plus bas dans la séquence, cette fissuration disparaît en raison du changement de granulométrie: on passe en effet à un niveau de sables très poreux (20-30 % de vides), dépourvu de matrice, et par conséquent moins sensible au gel.



Fig. 138 — Vue sous microscope des silts glaciolacustres soumis à du gel-dégel (microstructure lamellaire, réseau de fissures parallèles). (Echantillon GM45, lumière analysée, largeur: 3.4mm).

La microstructure lamellaire résulte d'un débitage du sédiment par des lentilles de glace de ségrégation. Expérimentalement, elle a pu être acquise sur sédiment limono-sableux après six cycles gel-dégel seulement³¹¹. L'absence de tout autre trace cryogénique indique que, dans le cas de Waldmatte, le nombre de ces alternances est resté inférieur à 50 environ³¹². Ce « coup de gel » s'insère chronologiquement au cours de la stabilisation du sédiment par drainage latéral, après disparition des conditions lacustres paraglaciales. Il a eu lieu vraisemblablement entre deux phases de sédimentation, mais avant les premiers effets de l'altération qui ont affecté la partie sommitale de la séquence.

Les précipitations de carbonates secondaires, postsédimentaires, se placent plus tardivement dans l'évolution du profil que les traces de gel. Elles résultent de plusieurs phases génétiques et sont en relation avec la pédogenèse. Deux types de concrétions ont été observés.

311 VAN VLIET-LANOË 1987.

312 VAN VLIET-LANOË 1985.

Il s'agit d'une part d'encroûtements développés sur la face inférieure des composants (fig. 139), dénommées pendeloques calcaires zonées³¹³. Van Vliet-Lanoë a pu démontrer que ces revêtements étaient d'origine biologique et se formaient préférentiellement sous des sols bien drainés et végétalisés³¹⁴. Selon ce même auteur, le développement de telles pendeloques est favorisé par un climat froid. Par conséquent, nous supposons qu'elles se sont développées au cours d'un stade préliminaire dans l'évolution pédogénétique, ce qui explique l'absence de telles concrétions dans les dépôts de bisses modernes, pourtant riches en carbonates. D'autres auteurs arrivent également à la conclusion que, dans le domaine arctique, la formation de pendeloques carbonatées s'amorce avant le développement d'un horizon B et qu'il n'y a pas lieu d'établir une relation étroite entre les deux processus³¹⁵. Dans Tr.15, on observe des précipitations analogues au sein même de la matrice, en particulier le long de discontinuités³¹⁶. Nous supposons que la genèse de ces pendeloques est le résultat d'une phase précoce de la pédogenèse qui s'insère chronologiquement à la fin du Tardiglaciaire.



Fig. 139 — Vue sous microscope des sables tardiglaciaires. On distingue les encroûtements carbonatés développés sur la face inférieure des grains minéraux. À gauche, des gravillons redressés suite au gel-dégel (échantillon GM45, lumière analysée, largeur: 3.4 mm).

D'autre part, les manchons racinaires constituent un autre type de concrétions calcitiques bien cristallisées. Ces nodules résultent d'une pédogenèse prolongée dans des conditions de milieu stables³¹⁷. Il semble fort probable que ce deuxième type de concrétion carbonatée soit en liaison avec le développement des sols à l'Holocène.

La couche 4 correspond à l'horizon d'altération d'un sol brun que nous avons dénommé sol 2 de BW-ouest³¹⁸ et dont les caractéristiques micromorphologiques sont conformes au type défini plus haut. Vu l'épaisseur totale de cet horizon, ainsi que sa rubéfaction prononcée (5YR4/3), on peut postuler qu'il résulte d'une phase de stabilité du versant relativement longue, sous un couvert végétal plutôt dense. Le contact avec les dépôts glacio-lacustres montre un horizon de transition légèrement altéré qui correspond au substrat colluvial (couche 5) sur lequel s'est développé le sol brun. Une deuxième couche de colluvions (couche 3), plus récente, coiffe l'horizon d'altération, ou couche 4. Elle s'individualise par l'état d'altération variable des graviers minéraux, par un degré d'oxydation plus faible que celui du sol sous-jacent et par un pourcentage plus élevé de charbons de bois, qui sont émoussés.

313 BLANK et FOSBERG 1990.

314 VAN VLIET-LANOË 1988.

315 COURTY *et al.* 1994.

316 Par exemple un contact entre deux couches de granulométrie différente, ou bien de texture semblable mais de porosité distincte.

317 BECZE-DEÁK *et al.* 1997.

318 Le sol supérieur (sol 1 de BW-ouest) qui existe sur 5 m dans la Tr.15, n'a pas fait l'objet d'un prélèvement micromorphologique à cet endroit. Par contre, ce sol a été échantillonné et étudié dans la Tr.19.

Le sol 1 de BW-ouest se développe sur ces colluvions (couche 3). Il est tronqué suite à une érosion importante qui s'insère avant l'accumulation des dépôts de bisses de texture silteuse.

Tr.19 (Stg 578 et Stg 579)

Le tableau de la figure 140 reprend les résultats les plus importants de l'analyse micromorphologique. À l'instar du profil de Tr.15, les sédiments glacio-lacustres tardiglaciaires occupent le pied de la séquence. Déformés, ceux-ci renferment également des calcaires secondaires, dont le développement est à mettre en relation avec la décarbonatation des couches sus-jacentes. Sous microscope, aucune trace de gel fossile n'apparaît en revanche dans la couche 7: son faciès sableux, peu gélif, ne paraît ainsi pas favorable au développement d'une telle microstructure³¹⁹.

319 VAN VLIET-LANOË 1988.

Couche	Micromorphologie	Interprétation
1	–	Horizon humifère actuel.
2	–	Dépôt de débordement des bisses.
3	Limon sablo-graveleux à matrice carbonatée de couleur brun-jaune (10YR4/3). Grains minéraux à différents stades d'altération. Forte bioturbation: structure agrégée, porosité moyenne (20%), chenaux et chambres, concrétions calcitiques de lombrics. Illuviation de carbonates. Présence de matière organique décomposée. Tests de gastéropodes. Rares paillettes de charbons de bois.	Colluvions humifiées.
4	Sables limoneux à graviers, plus graveleux vers la base. Matrice de couleur brun foncé (7,5YR3/4). Microstructure à chenaux et chambres, porosité moyenne. Décarbonatation complète, oxydation généralisée des fragments de roches. Calcschistes très corrodés. Accumulation de particules poussiéreuses dans les pores et dans la matrice. Charbons de bois roulés, présence d'un fragment d'os brûlé et de matière organique brûlée.	Horizon d'altération d'un sol brun, développé sur des colluvions post-incendie. Sol 1 de BW-ouest.
5	Limon sableux à gravillons. Matrice argilo-silteuse de couleur brun-rouge foncé (5YR4/6), plus abondante vers la base. Présence de gneiss, granites, micaschistes et calcschistes fortement altérés. Accumulation de particules poussiéreuses et oxydes de fer dans les pores et autour des grains. Nodules ferrugineux. Décarbonatation complète, présence de calcschistes très corrodés. Microstructure à chenaux et chambres, porosité faible. Au sommet, traces de bioturbation et charbons de bois épars.	Horizon d'altération d'un sol brun rubéfié, développé sur des colluvions. Erodé au sommet. Sol 2 de BW-ouest.
6	Limon sableux à gravillons. Matrice décarbonatée de couleur brun olive (5YR3/6). Microstructure à chenaux et chambres, porosité de 15%. Oxydation généralisée des composants: gneiss et granites à micas altérés, calcschistes très corrodés, fragments de quartz à veines oxydées. Nodules ferrugineux. Accumulation de particules poussiéreuses.	Colluvions, base de l'horizon d'altération.
7	Sables jaunes (2,5YR6/4) fins, bien triés (médiane: 100µ), avec des intercalations silteuses microlitées, avec dominance des quartz et micas, ainsi que quelques grains de carbonates (env. 5%) et amphiboles. Déformations après mise en place. Microstructure à entassement de grains, faible porosité. Illuviation de carbonates, préférentiellement entre les lits silteux.	Sédiment glacio-lacustre non altéré. Horizon d'accumulation de carbonates.

Fig. 140 — Waldmatte-ouest, tranchée Tr.19: résumé de l'analyse micromorphologique.

Dans la partie centrale de Tr.19 (Stg 579), un premier horizon d'un rouge assez intense (couche 5, 5YR4/6), dénommé sol 2 de BW-ouest, est conservé dans une petite dépression. Ses caractéristiques microscopiques correspondent à celles d'un sol brun rubéfié. En effet, tous les traits pédologiques typiques d'un horizon B y

sont réunis, y compris un enrichissement en particules fines et en oxydes de fer autour des composants, ainsi que le long des pores. Ce sol brun s'est développé sur un substrat d'origine probablement colluviale, à savoir la couche 6. La préservation de cet horizon s'explique par l'existence d'une petite dépression dans la pente et par le recouvrement de cette dernière par des colluvions. Ailleurs dans la tranchée, il a subi une ablation totale, comme le montre la partie ouest de la stratigraphie Stg 578, où le profil est tronqué jusqu'à l'horizon C. Sous microscope, on remarque que l'horizon A, humifère, fait défaut, bien que la densification des traces de bioturbation et l'enrichissement en charbons de bois suggèrent que la surface du sol de l'époque soit sus-jacente.

Après la mise en place de colluvions coiffant ce premier sol de faible extension latérale, une deuxième phase de pédogenèse affecte ces dépôts colluviaux, ou couche 4: elle mène ainsi à la formation d'un deuxième sol brun que nous dénommons sol 1 de BW-ouest. Les traits microscopiques de cet horizon, tels que charbons de bois roulés, ou fragments d'os et agrégats de sol brûlés, indiquent qu'il s'est développé sur des colluvions (fig. 141). Ce deuxième sol, nettement moins rouge que le précédent (7,5YR3/4), a également été tronqué par l'érosion avant d'être recouvert sous des colluvions hétérogènes (couche 3). Ces dernières montrent les traces d'un début de pédogenèse, à savoir une humification, dont l'évolution a été stoppée suite au recouvrement par des dépôts de bisses carbonatés, plus récents.

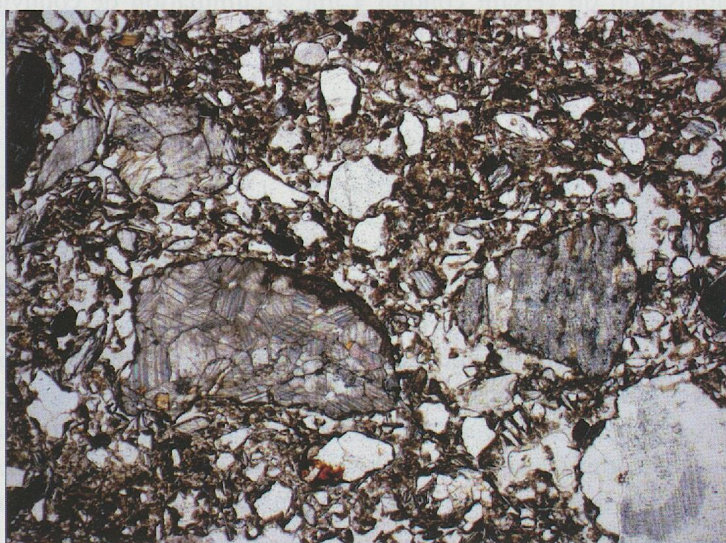


Fig. 141 — Waldmatte-ouest: vue sous microscope de colluvions (échantillon GM35, lumière analysée, largeur: 4,5 mm).

9.3.2.4 Synthèse partielle: succession des événements

Sur la base des observations de terrain et des résultats de laboratoire, nous pouvons proposer une reconstitution phénoménologique. Les correspondances avec les événements identifiés dans la synthèse chronostratigraphique sont mentionnées entre parenthèses (voir fig. 144).

- Le premier événement enregistré dans la séquence consiste en la mise en place de dépôts fins dans un milieu glacio-lacustre (BW-X, ensemble sédimentaire VI).
- Suite à un probable abaissement du niveau de l'eau, ces sédiments lacustres émergent et sont affectés par une ultime phase de déformation plastique.

- Des alternances gel-dégel mènent à la formation de lentilles de glace dans ces mêmes dépôts. Après fonte de cette glace dite de ségrégation, une structure lamellaire subsiste. Ce même pédoclimat semble avoir favorisé une décarbonatation précoce des sédiments fins, ainsi que la formation de pendeloques carbonatées sur les faces inférieures des graviers sous-jacents.
- Suit un premier épisode de colluvionnement (BW-X, VIII).
- Ces colluvions sont ensuite soumises à une altération pédogénétique qui mène à une précipitation de carbonates secondaires dans les sédiments tardiglaciaires. La pédogenèse se poursuit durant une longue période de stabilité du versant. Sous couvert végétal de type forestier, un sol brun rubéfié se forme (sol 2 de BW-ouest) (BW-X, IX).
- Episode d'incendie probable, déclenchant une rupture d'équilibre à l'échelle du versant: cet événement marque ainsi le début d'une nouvelle dynamique sédimentaire.
- Suit une phase d'érosion affectant le sol 2. Celui-ci n'est que partiellement conservé.
- La déstabilisation du versant conduit à une accumulation de colluvions post-incendie en bas de pente jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint (BW-X, X).
- Longue période de stabilité qui permet à nouveau le développement d'un sol brun rubéfié sur les dépôts de pente (sol 1 de BW-ouest) (BW-X, XI).
- Déstabilisation du versant et érosion de la partie sommitale de ce sol.
- Recouvrement du sol 1 par des colluvions (BW-X, XIII).
- Après stabilisation, la pédogenèse reprend pendant une courte période et un horizon humifère se développe au sommet du profil (BW-X, XIII sup.).
- Le coteau de Waldmatte-ouest est exploité pour l'agriculture (vergers et prairies): des dépôts de bisse viennent recouvrir ce sol humifère, peu évolué, et forment une séquence d'accrétion assez épaisse (BW-X, XIV). Le sol humifère actuel se trouve au sommet de cette dernière (BW-X, XV).

9.3.3 BILDACKER

9.3.3.1 *Présentation*

Le gisement de Gamsen-Bildacker est situé sur un petit promontoire à l'extrémité orientale du coteau de Gamsen. Des analyses micromorphologiques ont été réalisées dans quatre sondages (BB-S14 à BB-S17, voir chapitre III), cependant nous avons privilégié ci-dessous les données du sondage BB-S16 pour aborder la problématique paléopédologique (fig. 142). Mentionnons simplement qu'un horizon d'altération peu important a été observé dans le sondage BB-S15, tandis qu'un tuf calcaire est apparu sous les couches protohistoriques, dans le sondage BB-S14. Les profils de Bildacker apportent un complément pertinent à la séquence de sols enfouis présentée dans les deux chapitres précédents. Nous avons cependant renoncé à établir une

reconstitution phénoménologique à partir de cette séquence, dans la mesure où celle-ci s'avère très condensée, beaucoup moins complète que celles de Waldmatte.

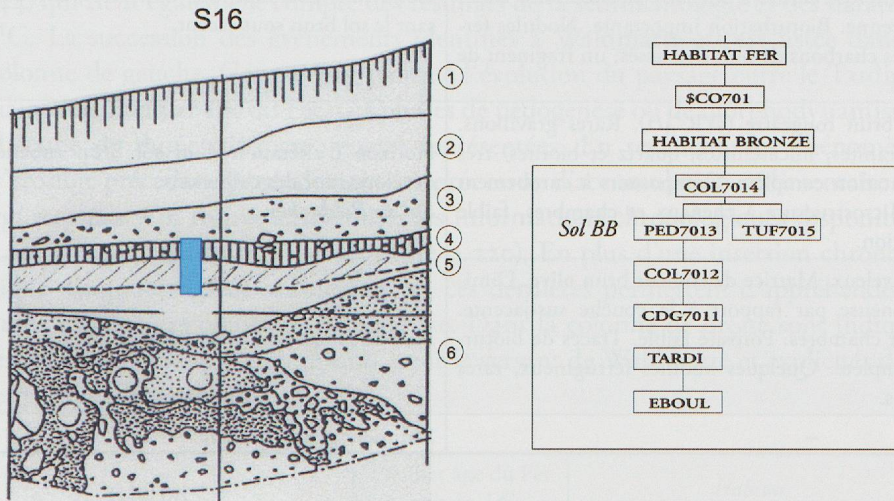


Fig. 142 — Bildacker, relevés de la coupe stratigraphique du sondage S16, avec localisation de l'échantillon micromorphologique (en bleu). Pour la situation en plan du sondage, voir Fig. 1. À droite, la séquence stratigraphique. Le sol BB correspond à la couche 4 du sondage.

9.3.3.2 Aperçu stratigraphique

Les sondages de Bildacker ont mis au jour la succession suivante. À la base tout d'abord, on trouve les traces d'un écroulement du Glishorn auquel se superpose un complexe constitué de sédiments glacio-lacustres très déformés, vraisemblablement tardiglaciaires. Dans le sondage BB-S16, le complexe glacio-lacustre est recouvert par une coulée de débris et par un premier dépôt de colluvions: un horizon d'altération se développe dans la partie supérieure de celles-ci. Le niveau pédogénisé est recouvert par un nouveau nappage de colluvions, elles-mêmes sous-jacentes aux premières traces d'occupation sur le site, datées de l'âge du Bronze³²⁰.

9.3.3.3 Micromorphologie

Les résultats des analyses microscopiques peuvent être résumés de la manière suivante (fig. 143). La couche 4 brun-rougeâtre, qui apparaît dans les deux sondages, correspond à l'horizon d'altération *in situ* d'un sol brun. Alors que dans le sondage BB-S16, la pédogenèse a affecté des colluvions et n'a pas influencé les sédiments sous-jacents, le processus d'altération s'étend, dans le sondage BB-S17, jusqu'à la partie supérieure, peut-être tronquée, des dépôts limniques. Dans les deux cas, les sols fossiles ne sont pas entièrement conservés et leur partie supérieure est remplacée par des colluvions. En comparaison du site de Waldmatte, différents indices suggèrent que le site de Bildacker a été nettement moins favorable à l'enregistrement sédimentaire au cours de l'Holocène. Les phénomènes d'érosion et/ou un taux de sédimentation relativement faible sont sans doute à l'origine de la présence d'un seul sol fossile, certes bien développé. Compte tenu des raisons évoquées plus haut et faute de datation ¹⁴C, l'insertion chronologique de ce sol ne peut être précisée.

³²⁰ Deux échantillons prélevés dans la même structure (foyer en cuvette A7042): EA557: Poz-41248, 2995 ± 35 BP, 1383-1116 BC cal. 2σ et EA577: CRG 1223, 2991 ± 71 BP, 1408-1021 BC cal. 2σ.

Couche	Micromorphologie	Interprétation
1	–	Horizon humifère actuel.
2	–	Dépôt de débordement de bisse.
CO701 3	Sables limoneux à rares gravillons. Matrice de couleur brun foncé. Grains minéraux (calcschistes, gneiss, granites, quartz, hornblende, micas) à différents stades d'altération. Microstructure à chenaux et chambres, zones microagrégées, porosité moyenne. Bioturbation importante. Nodules ferrugineux remaniés. Quelques charbons de bois émoussés; un fragment de terre cuite.	Colluvions post-incendie, humifiées, enfouissant le sol brun sous-jacent.
PED7013 4	Limon sableux de couleur brun rougeâtre (5YR 4/2). Rares gravillons. Grains minéraux (gneiss, granites, micaschistes, quartz et biotites) très altérés et oxydés, décarbonatation complète. Composants à enrobage argilo-silteux ferruginisé. Microstructure à chenaux et chambres, faible porosité. Traces de bioturbation.	Horizon d'altération d'un sol brun rubéfié, développé sur des colluvions. <i>Sol de Bildacker.</i>
COL7012 5	Sables limoneux, à peine graveleux. Matrice de couleur brun olive. Diminution de la fraction limoneuse par rapport à la couche sus-jacente. Microstructure à chenaux et chambres. Porosité faible. Traces de bioturbation, décarbonatation complète. Quelques nodules ferrugineux, rares paillettes de charbons de bois.	Base de l'horizon d'altération. Colluvions.
6	–	Sédiment glacio-lacustre.

Fig. 143 — Bildacker, sondage S16: résumé de l'analyse micromorphologique.

9.4 ÉLÉMENTS DE SYNTHÈSE

9.4.1 LES ACQUIS RELATIFS AUX SOLS ENFOUIS

Rappelons brièvement quelques points essentiels de notre contribution. Du point de vue stratigraphique tout d'abord, les sols fossiles analysés se positionnent dans la séquence médiane entre, à la base, des dépôts glaciolacustres tardiglaciaires (profils de BW-ouest et de Bildacker) - ou des dépôts de gravité de l'Holocène ancien (profils de BW-est) - et, au sommet, les niveaux d'occupation de l'âge du Bronze ou du Premier âge du Fer. En compilant les séquences mises au jour dans les coupes de Waldmatte-est, on peut répertorier au total quatre sols principaux, un cinquième apparaissant sous forme de lentilles discontinues au fond de la tranchée Tr.3³²¹. À l'exception du sol 2 de BW-est, de type brun humifère, seuls les horizons profonds sont conservés, les niveaux supérieurs ayant subi une ablation systématique au début des épisodes de ruissellement torrentiel. Au sommet des tranchées ouvertes, au-dessus des couches archéologiques, les sols actuels formés sur dépôt de bisse ou sur colluvions montrent des traits pédologiques nettement moins évolués que ces sols fossiles: ils sont de type humifère calcaire.

Plus précisément, les sols enfouis de Gamsen se rattachent au groupe des sols bruns. À Waldmatte-ouest et à Bildacker, ils ont atteint un stade d'évolution assez avancé, qui se marque par un net enrichissement en oxydes de fer de l'horizon d'altération: ce dernier se caractérise par une coloration rougeâtre assez intense d'où l'appellation de sol brun rubéfié. Nous avons vu que cette rubéfaction est vraisemblablement due à la présence d'hématite, en coexistence avec la goéthite. La formation de cet oxyde requiert des conditions spécifiques liées surtout au substrat sédimentaire et au pédoclimat, qui paraissent bien réunies dans le cas de Gamsen (voir chapitre 11). Mais il s'avère que le facteur temps joue également un rôle, par libération progressive du fer au cours de l'altération des grains minéraux. Ce processus pourrait expliquer pourquoi les sols bruns de Waldmatte-est présentent une couleur de gamme moins élevée que ceux de Waldmatte-ouest et de Bildacker³²²: dans la partie centrale du gisement, plus propice à une dynamique sédimentaire relativement active, les phases de stabilité du versant semblent avoir été d'une durée notablement plus courte.

³²¹ Il s'agit du sol PED9005 qui n'a pas fait l'objet d'une analyse micromorphologique.

³²² Soit 7.5YR pour BW-est et 5YR pour BW-ouest et Bildacker.

9.4.2 SÉQUENCE DE WALDMATTE: PHÉNOMÉNOLOGIE ET SIGNIFICATION

9.4.2.1 Introduction

Un bilan général des études pédologiques est présenté dans le tableau de la figure 144, qui tient également compte des résultats de la sédimentologie et des datations ¹⁴C. La succession des événements identifiés à Waldmatte-est est listée dans la colonne de gauche. Ceux-ci ont marqué l'évolution du paysage entre le Tardiglaciaire et le Premier âge du Fer. Les phases de pédogenèse ou de morphodynamisme, chacune de durée distincte, y sont représentées. En revanche, les phénomènes d'érosion précédant généralement les processus d'accumulation sédimentaire n'y figurent pas. On trouve aussi toutes les informations chronologiques disponibles, à savoir les datations ¹⁴C (voir encadré p. 220). En plus d'une insertion chronologique des processus de sédimentation, ces dernières permettent d'appréhender la durée relative des phases de pédogenèse. Dans la colonne de droite sont indiqués les événements les plus importants pour le versant de Waldmatte et explicités dans les paragraphes suivants.

HABITAT		Premier âge du Fer -700 av. J.C.	<i>Habitat</i>
COL9022		âge du Bronze (Bildacker)	Déstabilisation de la couverture pédologique: mise en place de pédosédiments <i>Ouverture progressive du paysage</i>
TOR9021			
COL9020			
TOR9025			
PED9019	Sol 1		Pédogenèse (sol brun)
t1w/126a	COL9018	-2000 av. J.-C.	Reprise sédimentaire et incendies récurrents
t1w/127	RUS9017		
t1w/128	INC9016	-3000 av. J.-C.	<i>Premières manifestations de la pres- sion anthropique?</i>
CB9015	TOR9013		
INC9014	PED9012		
PED9012	Sol 2		
CDG9011			Pédogenèses majeures: développement de trois sols bruns sous couvert forestier
TOR9024			<i>Stabilité du versant</i>
PED9010	Sol 3		
COL9023			
TOR9009			
PED9008	Sol 4		
t3a/76	RUS9007	-6000 av. J.-C.	Sédimentation active. Genèse d'un sol brun lors d'un bref arrêt
TOR9006	TOR9003		
PED9005	Sol 5		
TOR9004		Holocène ancien	<i>Rééquilibrage du versant</i>
CDG2002		Tardiglaciaire	Conditions périglaciaires: traces de gel et pédogenèse précoce
EB9001			Eroulement du Glishorn

Fig. 144 — Bilan des épisodes de pédogenèse et de la dynamique sédimentaire à Waldmatte. À gauche, succession des événements reconnus à Waldmatte-est, avec les différents sols. Au centre, les éléments de chronologie à disposition (voir encadré p. 220 pour l'énoncé exact des dates ¹⁴C). Commentaires dans le texte.

9.4.2.2 *Tardiglaciaire et Holocène ancien (avant 6000 av. J.-C.)*

L'écroulement du Glishorn³²³ mis en évidence par l'étude sédimentologique constitue le dépôt le plus ancien de la stratigraphie sur l'ensemble du site. À Waldmatte-ouest, celui-ci est coiffé par des sédiments glacio-lacustres du Tardiglaciaire qui ne montrent aucune trace de pédogenèse prolongée. Ces sédiments possèdent en revanche les indices discrets d'une phase d'altération initiale sous climat froid., exprimée par des traces de gel fossiles et probablement aussi par la présence de pendeloques carbonatées. La formation de ces dernières doit s'inscrire dans une phase précoce de la pédogenèse, au début de la décalcification du profil. À Waldmatte-est, la mise en place de dépôts détritiques³²⁴ fait suite à l'écroulement. Concernant le commencement de la formation des sols à l'Holocène ancien, les séquences étudiées ne nous donnent aucun point de repère précis. Cependant, pour la première pédogenèse enregistrée³²⁵, il existe des indices évidents de l'apparition d'un sol dont le développement se situe avant 6000 av. J.-C. On perçoit des signes analogues dans le secteur de Waldmatte-ouest: sur la base d'analyses palynologiques, la genèse du premier sol brun n'aurait pas débuté avant le Boréal.

9.4.2.3 *Les épisodes majeurs de pédogenèse au cours de l'Holocène*

Dans la période suivante, soit après 6000 av. J.-C., l'évolution du coteau se résume à un enchaînement de trois phases de pédogenèse à Waldmatte-est³²⁶, objet principal de notre étude. Du point de vue morphogénétique, la formation de ces sols successifs, bien que temporairement interrompue par des épisodes de ruissellement, indique une stabilité du versant. Générés à la faveur d'un couvert forestier³²⁷, ces sols bruns se sont en outre développés sur des substrats assez similaires, à savoir des dépôts de ruissellement³²⁸ et des colluvions³²⁹ issus du remaniement de terrains peu altérés. Par ailleurs, aucun indice micromorphologique de présence humaine n'a été détecté dans cette partie de la séquence.

9.4.2.4 *Reprise sédimentaire et récurrence des incendies*

Antérieur à environ 2000 av. J.-C., les prochains stades dans l'évolution de la séquence de Waldmatte-est consistent en une réactivation de la dynamique sédimentaire d'une part³³⁰ et par la répétition des incendies de forêt d'autre part³³¹. Ces incendies de forêt contribuent à la déstabilisation des versants. Le passage du feu rend en effet la couverture végétale discontinue, ce qui permet, entre autres, à l'action du gel de s'intensifier en saison hivernale³³². Les horizons sommitaux du sol subissent alors une déstructuration et deviennent de ce fait très vulnérables: ils auront tendance à s'éroder lors des ruissellements superficiels qui ont régulièrement lieu sur la pente. À Sierre-Creux de Chippis, dans une position géomorphologique comparable à celle de Gamsen³³³, nous sommes parvenus à un constat similaire: la succession événementielle pédogenèse - incendie - érosion - accumulation sédimentaire est récurrente³³⁴. L'analyse micromorphologique ne permet aucune discrimination quant à la cause naturelle ou anthropique de ces incendies, en l'absence de toute trace tangible de présence humaine dans les couches antérieures à l'âge du Bronze. Il paraît tout à fait plausible que des feux naturels puissent se déclencher aux environs de Brig, localité se caractérisant par une sécheresse estivale. La notion de paléoclimat peut également intervenir en ce sens que les périodes d'instabilité climatique sont propices au déclenchement des incendies de forêt, comme le révèlent des études en écologie³³⁵. D'ailleurs, pour Berger, qui a mené des recherches interdisciplinaires en moyenne vallée du Rhône³³⁶, ce sont les oscillations climatiques qui sont les principales responsables des phases d'évolution

323 EB9001.

324 CDG9002 et TOR9004.

325 PED9005.

326 PED9008, PED9010 et PED9012.

327 En l'absence de toute donnée palynologique ou anthracologique, aucune précision d'ordre botanique ne peut être apportée concernant cette colonisation par la forêt.

328 RUS9007, TOR9024.

329 COL9023.

330 TOR9013, CB9015, etc.

331 INC9014, INC9016, tlw/126a.

332 TALON 1997.

333 Soit en pied de pente, à l'ubac, sur la rive gauche du Rhône.

334 GUÉLAT *et al.* 1998.

335 BRADSHAW 1993.

336 Valdaine, Tricastin et Plaine d'Orange.

des paysages à l'Holocène, les pratiques humaines n'agissant que comme processus amplificateurs de ces crises³³⁷.

Cependant, la récurrence des incendies dans cette partie de la séquence de Waldmatte pourrait constituer le signe d'un premier impact humain sur le paysage et ceci dès le Néolithique. Vu les nombreux gisements de cette période découverts en Valais³³⁸, il est en effet difficile de concevoir que la région de Gamsen ne subisse pas l'importance croissante de cette pression anthropique.

9.4.2.5 Partie sommitale de la séquence

Un épisode de pédogenèse³³⁹ s'insère entre 2000 et 700 av. J.-C. environ et marque en quelque sorte la transition entre la période précédente, assez active du point de vue de la dynamique sédimentaire et la suivante, que nous abordons maintenant.

La partie supérieure de la séquence, sous-jacente aux couches du Premier âge du Fer, se caractérise par un changement de faciès sédimentaire: des dépôts de pente de type pédosédiments³⁴⁰ s'intercalent entre des épisodes torrentiels³⁴¹. Ces formations colluviales sont entre autres générées par le remaniement de sols localisés en amont dans la pente. Plus précisément, ces colluvions sont alimentées surtout par reprise de leur horizon supérieur, de type humifère, en compagnie de dépôts post-incendie. Ceci implique une fragilisation de la partie superficielle des sols qui se mettent à transiter dans le versant. Corollaire de cette déstabilisation de la couverture pédologique, aucun sol brun (avec un horizon B d'altération) n'apparaîtra désormais dans la séquence de Waldmatte, et ceci jusqu'à son sommet.

Opérant dans une phase peu active quant à la dynamique sédimentaire, ce déséquilibre ne peut cette fois-ci être attribué uniquement à des facteurs climatiques: il résulte de la colonisation du site par l'homme. Chronologiquement en effet, les premiers indices de l'occupation humaine, établis dans le secteur de Bildacker, remontent à l'âge du Bronze moyen daté de 1400-1100 av. J.-C.³⁴²; dès cette époque, l'impact des activités humaines, sous forme par exemple d'une ouverture progressive du paysage, a pu s'étendre sur le coteau adjacent de Waldmatte.

9.5 CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude proviennent de trois domaines sédimentaires qui possèdent chacun leur dynamique propre. Par conséquent, il s'avère très délicat d'établir une corrélation stricte entre les phases de pédogenèse observées dans ces différents secteurs. Les principaux obstacles résident d'une part dans l'absence de relations stratigraphiques entre les trois zones, qu'elles fassent effectivement défaut ou n'aient pas été observées, et d'autre part dans le manque de datations ¹⁴C, celles de Waldmatte-est mises à part. Ces dernières permettent toutefois d'esquisser les principales phases de stabilité qui se sont déroulées dans la partie centrale du site de Gamsen, entre environ 6000 et 700 av. J.-C.

Des incertitudes bien plus importantes subsistent dans l'insertion chronologique des sols fossiles de Waldmatte-ouest, car l'étude palynologique de cette séquence, inachevée, ne permet qu'une datation ponctuelle des dépôts. Comme aucune date absolue ne fixe la succession des deux sols, nous nous contenterons d'évoquer plus loin les résultats préliminaires de cette étude. Les résultats obtenus à Bildacker permettent de situer la phase de pédogenèse observée comme antérieure à la fin de l'âge du Bronze.

337 BERGER 1997.

338 BAUDAIS *et al.* 1990.

339 PED9019.

340 COL9020, COL9022.

341 TOR9021, TOR9025.

342 BENKERT *et al.* 2014.

Concernant l'estimation de la durée des phases de pédogenèse, on note que la fin de ces périodes de stabilité est assez aisée à fixer: les sols fossiles sont en effet tronqués au sommet par une érosion, elle-même suivie d'un enfouissement sous de nouveaux apports sédimentaires. En revanche, leur début pose problème: comme le relève Gobat, la fixation du point de départ de l'évolution d'un sol est en effet arbitraire et entièrement déterminée par le processus choisi comme «initialisant»³⁴³. Dans le cas présent, les datations ¹⁴C de charbons de bois se rapportent plutôt à la mise en place des dépôts sur lesquels les sols se sont par la suite développés. Autrement dit, cet âge correspond au tout début de la phase de pédogenèse. Ainsi, les deux premières datations de Waldmatte permettent de situer le substrat du sol 4 de BW-est³⁴⁴ vers la fin du VII^e millénaire avant notre ère. Au moins quatre sols bruns se développent successivement entre cette date initiale et le VII^e s. av. J.-C., soit dans un intervalle de temps d'environ 5300 ans (sol 1 à sol 4 de BW-est)³⁴⁵.

Par confrontation entre la succession des événements pédosédimentaires et les datations disponibles, nous avons tenté de chiffrer la durée moyenne des phases de pédogenèse à Waldmatte. Dans un précédent travail, nous avons déjà essayé d'estimer cet intervalle³⁴⁶. Après révision complète de la question et à la lumière de la présente étude, nous pouvons apporter quelques précisions.

En considérant les sols 4 à 2 de BW-est³⁴⁷ qui se sont formés dans un laps de temps d'environ 3000 ans d'après les datations radiocarbone, on arrive en effet à un ordre de grandeur sans doute inférieur au millénaire, sachant que d'autres événements sédimentaires se produisent dans l'intervalle. Dans la partie supérieure de la séquence, le sol 1 de BW-est³⁴⁸ se développe sur des colluvions riches en charbons de bois³⁴⁹. Ce sol brun se forme avant le Premier âge du Fer. Il est par ailleurs postérieur à la date de 2456-2042 BC cal. obtenue sur une souche carbonisée immédiatement sous-jacente. Ces données nous conduisent à chiffrer l'intervalle de temps entre 1300 et 1800 ans, au cours duquel s'est constitué le sol 1. D'autres événements dont la durée est difficile à estimer se produisent dans l'intervalle³⁵⁰. On peut donc admettre que la durée de cette dernière pédogenèse est de l'ordre du millénaire. En revanche, dans le cas des sols très rubéfiés de Waldmatte-ouest, deux pédogenèses ont eu lieu dans un intervalle d'au moins 6000 ans environ. On voit ainsi que le millénaire est un laps de temps raisonnable pour la formation de ce type de sol brun. Les quelques approximations que l'on trouve dans la littérature sont nettement supérieures à cette valeur. Birkeland estime le temps nécessaire à la genèse d'un horizon d'altération entre 5000 et 7000 ans, mais ce dernier peut apparaître après cinq siècles déjà³⁵¹. Dans la séquence de Gossau (SG) se trouve un brunisol dont le développement a duré 5000 ans au maximum³⁵². On retrouve ce même chiffre chez Gobat, mais considéré comme minimal cette fois pour la formation d'un horizon B d'altération³⁵³.

En résumé, l'intérêt majeur des séquences de Gamsen réside dans l'identification de plusieurs sols bruns un peu particuliers et surtout bien conservés. Chronologiquement bien insérées, ces pédogenèses traduisent, au niveau de l'évolution du paysage, des phases de stabilité. L'estimation chiffrée de leur durée constitue à notre connaissance un résultat inédit pour le domaine alpin centre-européen³⁵⁴.

343 GObAT *et al.* 1998.

344 PED9008.

345 PED9019, PED9012, PED9010 et PED9008.

346 GUÉLAT *et al.* 1998.

347 PED9008, PED9010, PED9012.

348 PED9019.

349 COL9018.

350 TOR9025 et TOR9021 ainsi que COL9020 et COL9022.

351 BIRKELAND 1984.

352 SCHLÜCHTER *et al.* 1987.

353 GObAT *et al.* 1998.

354 Les auteurs tiennent à remercier le bureau ARIA, à Sion, qui a dirigé l'étude des sites protohistoriques de Brig-Glis/Gamsen. Nous adressons un merci tout particulier à Claire Epiney-Nicoud et Alain Benkert pour le constant intérêt manifesté à l'égard de notre travail, mais aussi pour la relecture du texte et sa mise en forme définitive. Nous exprimons toute notre gratitude à Bernard Moulin pour les données mises à notre disposition, ainsi que pour les suggestions et échanges d'idées tout au long de cette étude.