

<b>Zeitschrift:</b>	Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Herausgeber:</b>	Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Band:</b>	27 (2017)
<b>Artikel:</b>	Influence des formations superficielles sur l'évolution des sols du Jura suisse : origine, composition et transformation du matériel minéral parental
<b>Autor:</b>	Martignier, Loraine
<b>Kapitel:</b>	4: Résultats
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-632528">https://doi.org/10.5169/seals-632528</a>

### 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:** 13.02.2026

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

## CHAPITRE 4. RÉSULTATS

### 4.1. Description des profils de sol

Cette section décrit brièvement les profils de sol étudiés, en fonction des caractères macroskopiques observés sur le terrain. Dans certains cas, des observations microscopiques (lames minces) ou des résultats analytiques (pourcentage d'argiles ou de matière organique) sont utilisés pour compléter ou justifier certaines appellations. Les descriptions détaillées des profils sont disponibles en annexe sous forme de fiches pédologiques. Dans le texte ci-dessous, ainsi que sur les fiches pédologiques, les valeurs données pour le pH pour chaque horizon sont mesurées directement sur le terrain grâce au pH-mètre Hellige. Il est donc possible que ces valeurs divergent un peu de celles mesurées en laboratoire ( $\text{pH H}_2\text{O}$ ) et présentées plus loin dans les paragraphes traitant des résultats analytiques.

#### 4.1.1. Site des Amburnex

Neuf fosses pédologiques ont été ouvertes le long de la toposéquence (figure 4.1). Dans deux d'entre elles (AMB 5 et AMB 8), la limite entre deux couches géologiques aux faciès différents a été mise à jour. C'est pourquoi les observations et/ou descriptions de terrain ont été réalisées sur plusieurs faces de la fosse, justifiant le dédoublement de certains profils (p. ex. AMB8A et AMB8B). Au total, dix profils de sol ont été décrits et analysés. Ils sont présentés brièvement ci-dessous, dans l'ordre allant du haut de la toposéquence vers le bas.

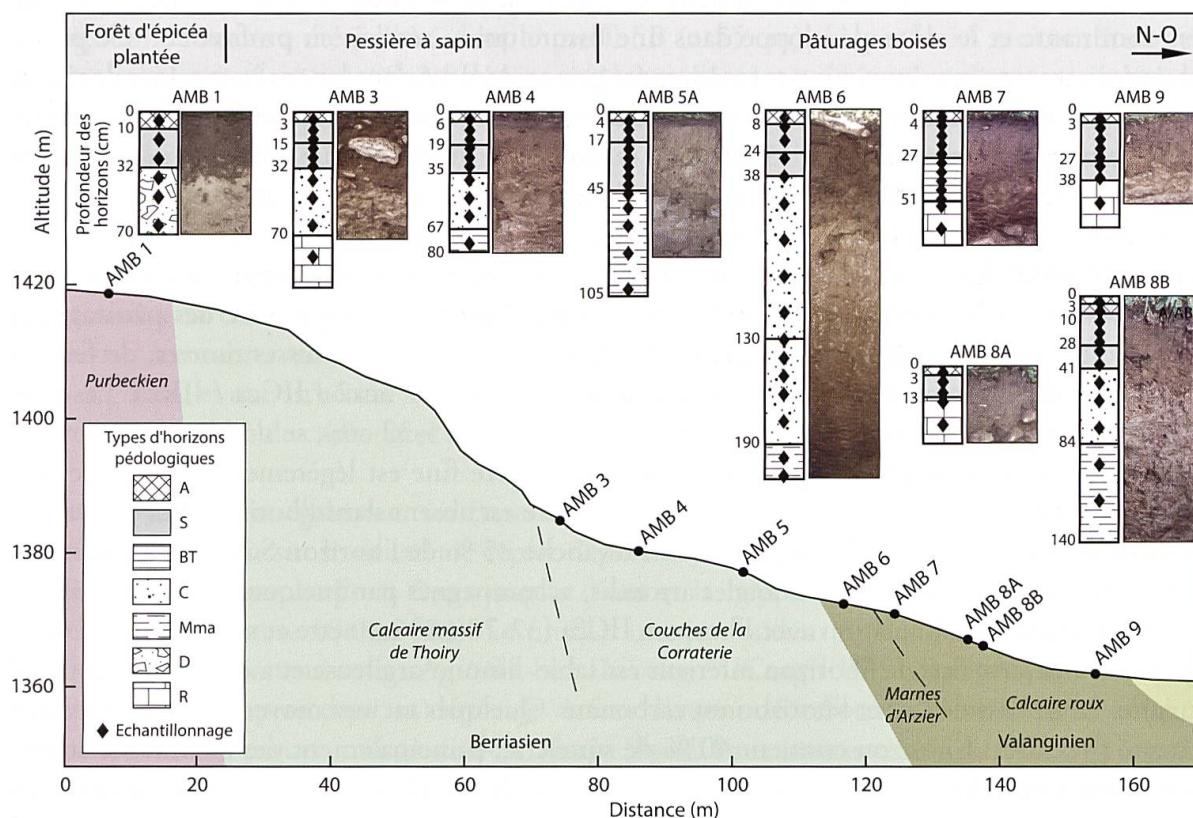


Figure 4.1. Coupe schématique de la toposéquence des Amburnex représentant les substrats lithologiques, l'emplacement des profils de sol et le type de végétation. Les profils étudiés (excepté AMB 2) sont illustrés par une photo et leur séquence d'horizons (nomenclature des horizons selon AFES, 2009). Les profondeurs moyennes des points d'échantillonnage du sol et de la roche sont indiquées.

**Le profil AMB 1** est un CALCOSOL. Il se trouve sur le replat au point haut de la toposéquence, dans une forêt plantée d'épicéa. La litière, composée d'aiguilles d'épicéa et de mousses mortes, est discontinue. Les deux premiers horizons AcaSca (0-10 cm) et Sca (10-32 cm) se développent dans un dépôt de surface de texture limono-argileuse très pauvre en éléments grossiers. Le pH est de 5-6 dans ces horizons, qui sont légèrement carbonatés. La transition avec l'horizon sous-jacent est très nette et de forme ondulée, avec quelques taches de mélange. Le troisième horizon, IIDca (32-70 cm), est une moraine carbonatée. Elle est composée de 50 % de pierres, cailloux et graviers calcaires aux arêtes émuossées. La terre fine est de texture sablo-argileuse et son pH est de 6-7.

**Le profil AMB 2** est un ORGANOSOL INSATURÉ. Il est situé dans le versant boisé, sur un étroit replat entre deux bancs calcaires redressés (Calcaire de Thoiry). La forêt est de type pessière à sapin et la végétation basse est dominée par les myrtilles et les mousses. Le bois mort est très abondant à la surface du sol, ainsi que dans le profil. La séquence d'horizons est la suivante: OF / OH / Aciho / AcihoRca. Les horizons OF et OH ont une épaisseur cumulée de 8 cm. Ils contiennent de nombreuses racines et du mycélium. La transition est diffuse avec l'horizon Aciho (5-30 cm), dont la texture n'a pas pu être évaluée sur le terrain en raison de la trop grande quantité de matière organique. La structure est grumeleuse, les racines sont toujours nombreuses et le squelette est absent. Le pH est < 4 et l'horizon n'est pas carbonaté. Le dernier horizon AcihoRca (30-55 cm) a une texture limoneuse et une structure grumeleuse. Les racines de toutes tailles sont toujours abondantes, de même que les hyphes de champignons. Le pH est de 5-6 et la terre fine est carbonatée à partir de 50 cm de profondeur. La roche calcaire en place est dominante et le sol se développe dans une fissure qui se rétrécit en profondeur. Ce profil, majoritairement organique, n'a pas toujours été pris en compte dans les analyses minéralogiques et granulométriques car la forte proportion de matière organique masquait les caractéristiques de la fraction minérale. Le taux de saturation du complexe argilo-humique n'a pas été mesuré en laboratoire et le nom d'Organosol insaturé reflète le pH bas (< 4) de l'horizon Aciho.

**Le profil AMB 3** est un CALCOSOL. Il se trouve en bas de pente et est fortement influencé par les colluvions et le matériel fin ruisselé. La forêt est clairsemée à l'approche des pâturages et la strate herbacée est bien développée. La litière est composée de mousses mortes, de feuilles d'érable et d'herbacées. Les horizons décrits sont: Aca / Sca1 / Sca2 / IICca / IIRca. Les trois premiers horizons, Aca (0-3 cm), Sca1 (3-15 cm) et Sca2 (15-32 cm), se développent dans un dépôt de texture limoneuse. Le pH est de 5-6 et la terre fine est légèrement carbonatée. Les racines de toutes tailles sont nombreuses. Le squelette est absent dans l'horizon Aca et très peu présent dans l'horizon Sca1. Il représente en revanche 25 % de l'horizon Sca2, principalement sous forme de blocs calcaires aux angles arrondis, accompagnés par quelques pierres et cailloux de même nature. La transition avec l'horizon IICca (32-70 cm) est nette et suit une *stoneline* de gélifracts. La terre fine de l'horizon inférieur est sablo-limono-argileuse et a une structure particulière. Le pH est de 6-7 et l'horizon est carbonaté. Quelques racines moyennes et grosses sont encore présentes. L'horizon contient 40 % de squelette, principalement des gélifracts calcaires aux arêtes vives. À partir de 70 cm, la roche en place du Berriasien est présente et se délite en gros blocs.

**Le profil AMB 4** est un BRUNISOL DYSTRIQUE. C'est le premier profil dans les pâturages boisés, où la pente est d'environ 10°. Ce profil de sol ne contient presque aucun élément grossier, ce qui est étonnant au vu de sa situation en bas de versant. Six horizons ont été décrits: A / Sg

/ S / Sca / IICca / IIMmaca. Les deux premiers horizons, A (0-2 cm) et Sg (2-6 cm), ont été réunis pour les analyses, du fait de leur faible épaisseur respective. Ces horizons sont limoneux, ont un pH de 5 et ne sont pas carbonatés. La transition entre les horizons A et Sg est nette et visible par un changement de structure et de couleur, dû à la présence de nombreuses taches d'oxydo-réduction dans l'horizon Sg. L'horizon S (6-19 cm) est également limoneux. Son pH est de 4 et il est décarbonaté. La transition est nette avec l'horizon suivant, Sca (19-35 cm). Ce dernier est de texture argileuse et contient quelques charbons et des débris de fossiles. Son pH est de 5 et il est carbonaté à partir de 26 cm de profondeur. C'est un horizon de transition entre le dépôt de surface et les marnes altérées du Berriasien en profondeur. Les deux derniers horizons, IICca (35-67 cm) et IIMmaca (67-80 cm), sont de texture sablo-argileuse et de structure massive. Le pH est de 6-7 et quelques taches de carbonates secondaires sont observées dans le dernier horizon. Ce profil appartenant au groupe des BRUNISOLS a été déterminé comme étant un BRUNISOL DYSTRIQUE au regard du pH de l'horizon S, étant donné que le taux de saturation du complexe d'échange n'a pas été mesuré. La même remarque est valable pour tous les profils de type BRUNISOL décrits sur les deux sites d'étude.

**Le profil AMB 5A** est quant à lui un BRUNISOL DYSTRIQUE - RÉDOXISOL. La fosse pédologique se situe dans les pâturages boisés, au bas du premier replat depuis la forêt. La fosse est creusée à la limite entre des marnes et des calcaires (calcaires marneux de la Corraterie). Le profil 5A correspond à la face amont de la fosse et se trouve sur substrat marneux. Le profil 5B se trouve sur la face en aval, sur les calcaires durs. Il n'a pas été décrit entièrement ni prélevé, car il semblait similaire au premier profil, en ce qui concerne les horizons de surface (< 50 cm). Seul un échantillon de roche a été prélevé dans le profil 5B (> 55 cm). Le profil 5A est constitué des horizons suivants : Ag / Sg1 / Sg2 / IIMmaca. Aucun élément grossier n'a été remarqué dans le profil. Dans les horizons situés dans le dépôt de surface (Ag, Sg1, Sg2), des charbons ont été observés. Les horizons supérieurs, Ag (0-4 cm) et Sg1 (4-17 cm), ont une texture limoneuse. Le pH est de 4-5 et la terre fine est décarbonatée. Les racines fines sont abondantes. Des taches d'oxydo-réduction sont présentes dans l'horizon Ag, ainsi que dans l'horizon sous-jacent Sg2 (17-45 cm). Celui-ci, de texture argileuse, a un pH de 4-5 et est carbonaté à partir de 36 cm. La transition est très nette avec les marnes (surface d'érosion probable). La limite est ondulée et des racines sont observées à l'interface. L'horizon marneux IIMmaca (45-105 cm) a une texture sablo-argileuse et une structure litée par endroits (zones de couleur lie-de-vin). Le pH est de 6-7 et quelques nodules de carbonates secondaires sont présents.

**Le profil AMB 6** est également un BRUNISOL DYSTRIQUE, à caractère luvique. Il se situe dans les pâturages boisés, sur le deuxième replat depuis la forêt (pente < 5°). Deux semaines après l'ouverture de la fosse, celle-ci était remplie d'eau et la nappe arrivait jusqu'à 85 cm de profondeur (description le 18.08.2009). Le profil a une profondeur totale de 200 cm et présente la séquence d'horizon suivante : Ag / S / St / IICcakg / IICcag / IIMmaca. Les trois premiers horizons se développent dans un dépôt de surface. Ils sont décarbonatés et ne contiennent pas de squelette, mis à part un unique caillou calcaire altéré. La texture est limoneuse dans l'horizon Ag (0-8 cm), argilo-limoneuse dans l'horizon S (8-24 cm) et argileuse dans l'horizon St (24-38 cm). Des revêtements argileux observés en lames minces dans ce dernier horizon témoignent du processus de lessivage des argiles, qui n'est cependant pas assez exprimé pour justifier l'appellation d'un horizon « BT ». Le pH est de 5 dans l'horizon de surface, puis diminue à des valeurs de 4-5 dans l'horizon S, avant d'augmenter à 5-6 dans le troisième horizon. Des taches d'oxydo-réduction sont observées dans l'horizon Ag et jusqu'à 12 cm de profondeur. La transition est

nette et de forme sinuuse avec l'horizon IICcakg (38-130 cm), issu du deuxième substrat lithologique marneux. Cet horizon épais est de texture sablo-argileuse et est entièrement carbonaté. Son pH est de 6-7 en haut de l'horizon et augmente jusqu'à 8 en bas. De nombreux nodules de carbonates secondaires sont observés dans tout l'horizon, ainsi que des taches d'oxydo-réduction. La transition est graduelle avec l'horizon suivant IICcag (130-190 cm). La terre fine a une texture sableuse et un pH de 8. La structure est litée par endroitss, rappelant celle des marnes sous-jacentes IIMmaca (190-200 cm). Leur texture est argileuse et le pH de 8-9. Elles sont de couleur grise et ont été identifiées comme étant les marnes d'Arzier.

**Le profil AMB 7** est un NEOLUVISOL à caractère réodoxique, situé à la rupture de pente avant le talus suivant. Les horizons déterminés sont : Ag / SE / BTg / IIScaRca. Il n'y a pas de squelette présent dans le profil. L'horizon Ag (0-4 cm) a une texture limoneuse et contient beaucoup de racines fines. Son pH est de 5 et il est décarbonaté. Des taches d'oxydo-réduction sont observées jusqu'à 10 cm de profondeur. L'horizon suivant SE (4-27 cm) est également de texture limoneuse. Son pH est de 4 et il n'est pas carbonaté. Quelques charbons ont été observés à 15 cm de profondeur. La transition est nette avec l'horizon suivant BTg (27-51 cm). Il est de texture argilo-limoneuse et des revêtements argileux ont été observés en lames minces dans la porosité. Le pH est de 5 et la terre fine est carbonatée à partir de 47 cm de profondeur. De grosses taches d'oxydo-réduction (couleur rouille et gris-vert) parsèment l'horizon. La roche en place (Calcaire Roux) est atteinte à 51 cm de profondeur. Dans les fissures de la roche, la terre fine est argileuse, avec un pH de 6-7 et reste carbonatée (horizon IIScaRca). L'indice de différenciation texturale (IDT) du solum est de 1.29. Cette valeur, légèrement inférieure à celles définissant normalement les NEOLUVISOLS (IDT situé entre 1.3 et 1.8 ; AFES, 2009), indique que le processus de lessivage n'est pas très développé.

**La fosse pédologique AMB 8** est située dans le dernier talus (pente 10°) en bas de la toposéquence. Un changement de banc géologique est observé dans cette fosse, entre le Calcaire Roux apparaissant sur la face amont et des marnes intercalaires situées dans la partie aval de la fosse. Deux profils de sol ont été décrits : le profil AMB 8A sur Calcaire Roux et le profil AMB 8B sur marnes.

**Le profil AMB 8A** est un BRUNISOL EUTRIQUE, malgré sa faible épaisseur. Il est composé des horizons suivants : A / S / IIScaRca. L'horizon A (0-3 cm) a une texture limono-argileuse et une structure grumeleuse. Les racines fines sont abondantes. La terre fine a un pH de 6 et est décarbonatée. Le squelette est absent. L'horizon S (3-13 cm) est de texture limoneuse et de structure polyédrique. Les racines sont moins présentes. Le pH est de 5 et l'horizon est également décarbonaté. Quelques cailloux calcaires entourés d'un cortex d'altération sont présents. La roche en place est atteinte à partir de 13 cm. La dalle est fracturée et se délite en plaques. Entre les pierres, l'altération de la roche permet la création d'un horizon IISca, de texture argileuse et de structure polyédrique. Le pH est de 6 et la terre fine est légèrement carbonatée.

**Le profil AMB 8B** est quant à lui un BRUNISOL DYSTRIQUE. Il se développe sur les marnes et présente la séquence d'horizon suivante : A / AS / S / IISca / IICca / IIMmaca. Les trois premiers horizons, A (0-3 cm), AS (3-10 cm) et S (10-28 cm) sont issus d'un dépôt de surface. Ils sont de texture limoneuse à argilo-limoneuse, ont un pH entre 5 et 6, sont décarbonatés et ne contiennent pratiquement aucun élément grossier. Les racines fines sont nombreuses dans l'horizon A, puis sont accompagnées par des racines de taille moyenne et grossière dans les

horizons AS et S. Les trois horizons suivants, IISca, IICca et IIMmaca, se développent à partir des marnes en place. L'horizon IISca (28-41 cm) est un horizon intermédiaire. Sa texture est argilo-sableuse et il contient quelques graviers et cailloux calcaires, ainsi que des fragments de fossiles issus des marnes sous-jacentes. La terre fine a un pH de 6 et est carbonatée. À partir de cet horizon, les racines ne sont plus présentes. La transition est nette avec l'horizon d'altération IICca (41-84 cm). La texture devient sablo-argileuse et les éléments grossiers représentent 40 % du volume de l'horizon. Le squelette est essentiellement composé de graviers calcaires et de fossiles, accompagnés par quelques cailloux. Le pH est de 8. Le dernier horizon IIMmaca (84-140 cm) correspond aux marnes en place. La texture est également sablo-argileuse et le squelette compose jusqu'à la moitié de l'horizon. Le pH est de 8.

**Le profil AMB 9** est également un BRUNISOL DYSTRIQUE, à caractère réodoxique. Il se trouve sur un replat au point bas de la toposéquence, à proximité du marais. La séquence d'horizons est la suivante: A / Sg / IISca / IIRca. L'horizon A (0-3 cm) a une texture limoneuse et une structure grumeleuse. Il ne contient pas d'éléments grossiers. De nombreuses racines, essentiellement fines, sont présentes. Le pH est de 5 et la terre fine est décarbonatée. L'horizon Sg (3-27 cm) a une texture argilo-sablo-limoneuse et une structure polyédrique. Le squelette est absent également. L'horizon a un pH de 5 et est décarbonaté. Des taches d'oxydo-réduction, ainsi que quelques charbons, sont observées. La transition est nette avec l'horizon IISca (27-38 cm) et la limite est ondulée. La texture de cet horizon est argileuse et la structure polyédrique massive. Le pH est de 6 et la terre fine est légèrement carbonatée. Quelques cailloux calcaires pulvérulents sont observés. La roche en place, IIRca (Calcaire Roux), est atteinte à partir de 38 cm. Elle est fracturée et se délite en fragments décimétriques.

#### 4.1.2. Site de Ballens

Huit stations ont été choisies le long de la toposéquence de Ballens (figure 4.2), de manière à représenter les différentes unités du paysage. Les quatre stations situées dans la pente (BAL 4 à BAL 7) forment un gradient altitudinal le long du versant, avec un écart d'environ 100 m d'altitude entre chaque site. Aux deux premières stations (BAL 1 et BAL 2), aucune moraine n'a été observée. Un profil de sol a été creusé sur chaque site. Aux stations BAL 3 à 6, deux types de substrat (moraine et roche calcaire en place) ont été identifiés et un profil de sol a été creusé sur chacun d'eux. Les profils situés sur moraine sont nommés « A » (p. ex. BAL 3A) et ceux sur dalle calcaire en place sont nommés « B » (p. ex. BAL 3B). Un profil supplémentaire a été creusé au site 3 (BAL 3C), dans un dépôt de lœss remobilisé. Au site BAL 5, le profil BAL 5B aurait dû représenter un sol sur dalle calcaire. Mais celle-ci ne fut atteinte qu'à 115 cm de profondeur, étant en réalité recouverte de moraine mixte à dominance calcaire. Par conséquent, le profil BAL 5B a été rattaché à la catégorie des sols sur moraine mixte. En ce qui concerne les deux dernières stations, BAL 7 et CHX, il n'était plus possible de trouver des sites sur dalle calcaire en place. En effet, la totalité du paysage est recouverte de dépôts quaternaires en dessous de 900 m d'altitude environ.

Au total, treize profils de sol ont été creusés sur cinq types de substrat :

- Les sols sur lœss remobilisé : BAL 2, 3C
- Les sols sur roche calcaire en place : BAL 1, 3B, 4B, 6B
- Les sols sur moraine calcaire : BAL 3A, 4A
- Les sols sur moraine mixte : BAL 5A, 5B, 7, CHX
- Le sol sur moraine cristalline : BAL 6A

Les profils de sol sont décrits brièvement en fonction de leur type de substrat.

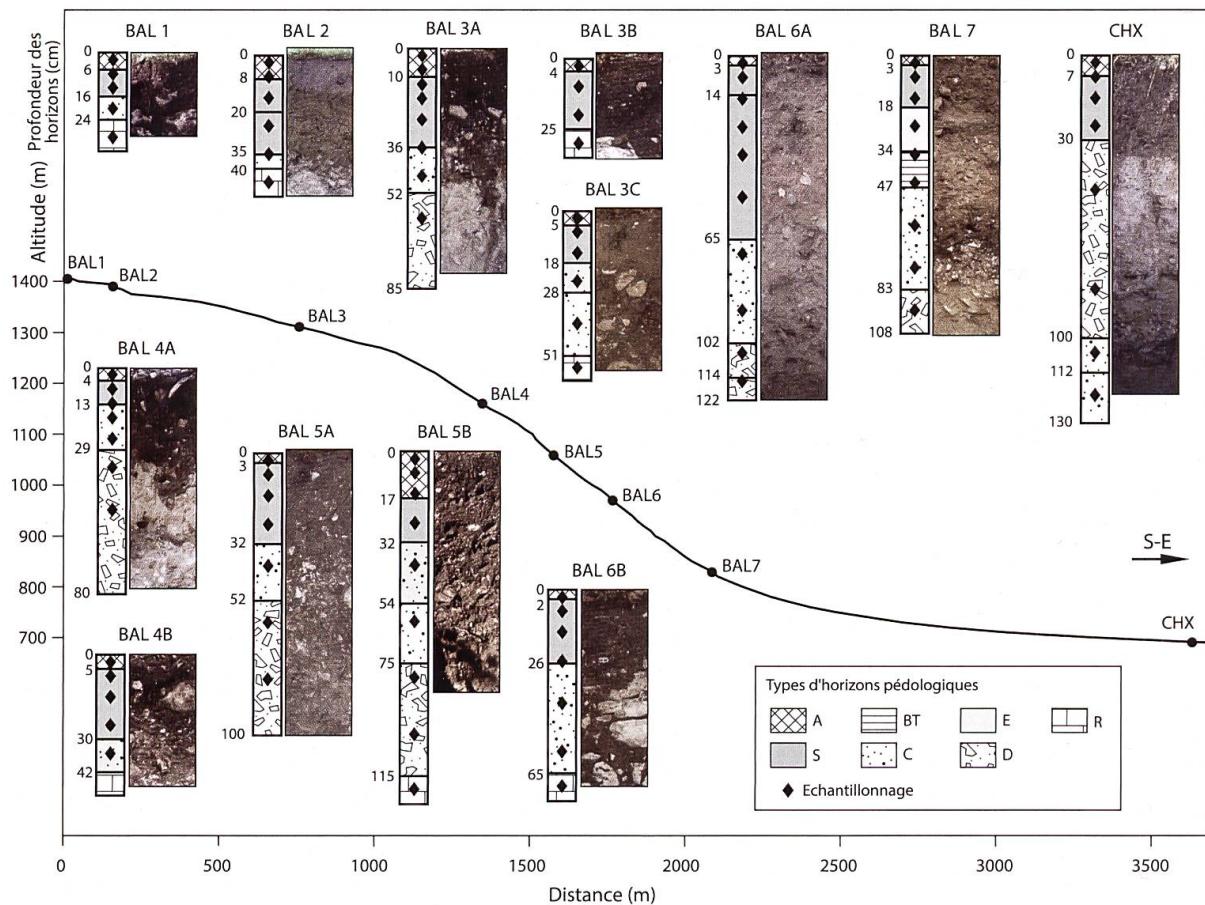


Figure 4.2. Coupe topographique du transect de Ballens et localisation des sites d'étude. Les profils de sol sont illustrés et schématisés par leur séquence d'horizons pédologiques (AFES, 2009). Les points d'échantillonnage sont indiqués par leur profondeur moyenne.

### Les sols sur lœss remobilisés

**Le profil BAL 2** est un BRUNISOL DYSTRIQUE luvique. Il est situé dans les pâtures boisées en haut de la toposéquence, dans une petite dépression remplie d'environ 30 cm de matériel fin accumulé sur la dalle du Kimmeridgien, fracturée en surface. La séquence des horizons est la suivante: Ag / Sg / St / IICca / IIRca. Les trois horizons de surface, Ag (0-8 cm), Sg (8-20 cm) et St (20-35 cm) se développent dans le dépôt superficiel de lœss. Ils présentent des taches d'oxydo-réduction liées à une compaction du sol due au piétinement par le bétail. La texture est limoneuse dans l'horizon Ag et s'enrichit progressivement en argiles jusqu'à l'horizon St. Des revêtements argileux sont observés dans les lames minces de cet horizon, confirmant la présence de processus de lessivage des argiles. Le pH est de 4-5 dans les deux premiers horizons et augmente à 5-6 dans le troisième. Ces trois horizons ne contiennent pas de squelette et sont décarbonatés. Quelques charbons sont observés dans l'horizon Ag. L'horizon d'altération des fragments calcaires IICca (35-40 cm) est quant à lui de texture argileuse et de structure massive. Son pH est de 8 et il est entièrement carbonaté. Le squelette représente 50 % de cet horizon, sous la forme de graviers, cailloux et pierres calcaires. La dalle calcaire sous-jacente est présente à partir de 40 cm.

**Le profil BAL 3C** est également un BRUNISOL DYSTRIQUE. Il se trouve dans la forêt en haut du versant. Le sous-bois est constitué de repousses de hêtre et d'épicéa, ainsi que de quelques herbacées, fougères et myrtilles. L'emplacement du profil est situé dans un talweg à pente légère

(< 5°). La dalle du Kimmeridgien est présente dès 51 cm de profondeur. Elle est recouverte d'un premier horizon contenant du squelette calcaire, puis d'un dépôt de surface constitué de matériel fin ruisselé. La séquence des horizons indique cette discontinuité lithologique: A / S / IIICca / IICca / IIRca. Les horizons de surface A (0-5 cm) et S (5-18 cm) ont une texture limoneuse à limono-argileuse et contiennent 2 % de cailloux calcaires. Le pH est de 4-5 dans l'horizon A et de 5-6 dans l'horizon S. Le troisième horizon IIICca (18-28 cm) est un horizon de transition entre les deux substrats. La texture est limono-argileuse et le squelette calcaire représente 5 % de l'horizon. Le pH est de 6 et la limite des carbonates se situe à 25 cm. La transition est très nette avec l'horizon d'altération sous-jacent IICca (28-51 cm), qui contient 40 % de squelette sous forme de graviers, cailloux et pierres calcaires anguleux. La texture est limono-argileuse et le pH est de 6. L'horizon est carbonaté et contient la plus forte densité de racines du profil. Cet horizon repose directement sur la dalle calcaire en place (IIRca).

Ces deux profils présentent le même type de séquence d'horizons, soit A / S / IIICca / IIRca. Au fond du profil, la dalle calcaire fragmentée est présente. Elle est surmontée par un horizon d'altération où l'important squelette calcaire est pris dans une matrice argileuse ou argilo-limoneuse carbonatée. L'origine de ce matériel est soit autochtone (issu de la fracturation de la dalle en place), soit subautochtone (issu du colluvionnement de fragments ou gélifracts calcaires). Dans la deuxième hypothèse, la nature des colluvions est vraisemblablement la même que celle de la roche en place (Kimmeridgien). C'est pourquoi une rupture lithologique n'a pas été jugée nécessaire entre les horizons IICca et IIRca. Sur l'horizon d'altération IICca, du matériel fin a été soliflué, se mélangeant légèrement avec l'horizon sous-jacent dans le profil BAL 3C. Ce dépôt composé de loess remaniés a une texture limoneuse à limono-argileuse et ne contient pas de matériel grossier. Les horizons se développant dans ce dépôt sont décarbonatés et acides (pH entre 4 et 6). Ces conditions permettent un début de lessivage des argiles, mieux exprimé dans le profil BAL 2. Néanmoins, la proximité des horizons carbonatés (à environ 30 cm de profondeur) permet de recharger légèrement les horizons de surface en cations alcalins et alcalino-terreux (notamment en calcium) sous l'action de la bioturbation (racines, vers de terre, etc.). La fixation de ces cations sur le complexe argilo-humique se fait au détriment de celle des ions H<sup>+</sup>, ce qui induit une diminution de la concentration en protons dans la solution du sol et par conséquent une légère remontée des valeurs de pH dans les horizons concernés.

### **Les sols sur roche calcaire en place**

**Le profil BAL 1** est un CALCISOL situé dans les pâturages boisés, sur la crête au point haut de la toposéquence, et est constitué des horizons Aciho / Sciho / Cca / Rca. Les horizons Aciho et Sciho, d'une épaisseur totale de 16 cm, ont une texture limono-argileuse et un pH de 5. Ils sont décarbonatés et considérés comme hémioorganiques (teneur en Corg > 8 g / 100 g de terre fine séchée; AFES, 2009). Le squelette calcaire est présent jusqu'à la surface (10 % dans l'horizon Aciho, 40 % dans l'horizon Sciho), sous forme de cailloux, pierres et blocs calcaires aux arêtes émoussées. La dalle du Portlandien (horizon Rca) est atteinte à partir de 16 cm de profondeur. Elle est fortement diaclasée et un horizon d'altération Cca se développe dans les fissures.

**Le profil BAL 3B** est également un CALCISOL, présentant la séquence d'horizons suivante : OF / OH / Aciho / Sciho / Rca. Le profil est situé dans la forêt, en haut de versant (pente de 10°). De nombreux blocs calcaires recouverts de mousses sont visibles à la surface du sol, probablement issus du démantèlement des bancs du Kimmeridgien affleurant aux alentours. Le sous-bois est principalement composé de repousses de hêtre et d'épicéa et quelques plants de fougère et de myrtille ont été signalés. La surface du solum est recouverte par une litière continue de feuilles

de hêtre. Sous la litière, un horizon humifère OF / OH de 7 cm d'épaisseur riche en mycélium est présent. Le profil comporte un mince horizon Aciho (0-4 cm de profondeur) et un horizon Scih (4-25 cm). Ces deux horizons sont décarbonatés, de texture limoneuse et présentent un pH de 5 à 6. Les racines de toute taille y sont très nombreuses. Le squelette ne représente que 2 % des horizons et est constitué de cailloux calcaires plats aux angles émoussés. L'horizon Scih repose directement sur la dalle en place (Rca), qui est atteinte à 25 cm de profondeur.

**Le profil BAL 4B** est un CALCOSOL décarbonaté en surface. Il se trouve dans une zone un peu plus ouverte de la forêt due à des coupes. La végétation herbacée est clairsemée et à tendance sèche. Quelques repousses de hêtre et d'épicéa sont observées. La pente est de 15° et des cailloux calcaires colluvionnés sont visibles à la surface du sol. Le profil a une profondeur totale de 42 cm et présente la séquence d'horizons suivante : Aciho / Scaho / Cca / Rca. La texture du sol est limoneuse et les racines sont abondantes dans tout le profil. Le pH passe de 5 à la surface à 7 en profondeur. Les horizons Scaho et Cca sont carbonatés et contiennent 40 % de squelette calcaire de toutes les tailles. Les blocs aux angles arrondis dominent dans l'horizon Scaho, alors que dans l'horizon Cca les graviers sont majoritaires. Cette répartition du squelette en fonction de sa granulométrie pourrait évoquer un événement de colluvionnement (tri grossier des éléments selon leur taille). La dalle du calcaire Kimmeridgien est présente dès 42 cm de profondeur.

**Le profil BAL 6B** est un CALCISOL humique. Il est situé juste au-dessus d'un affleurement du Kimmeridgien, sur une pente de 25°. Des blocs erratiques cristallins sont observés autour du profil. La surface du sol est couverte par de la litière de hêtre et des branches mortes (coupes de bois). La dalle calcaire en place est présente dès 10 cm de profondeur, sous la forme de blocs diaclasés aux angles arrondis. Le profil décrit se situe entre deux blocs, espacés d'environ un mètre à la surface et se rapprochant vers le fond du profil. La séquence des horizons est Acih / Scih / CcaRca / Rca. L'horizon Acih est très mince (2 cm) et riche en mycélium. L'horizon Scih (2-26 cm de profondeur) est décarbonaté, de texture limoneuse et affiche un pH de 5. Le squelette (10 %) est constitué de cailloux calcaires émoussés, parmi lesquels sont observés quelques graviers cristallins. À 10 cm de profondeur, une couche de graviers cristallins est observée dans le profil, probablement issus d'un événement de colluvionnement. La transition est graduelle avec l'horizon CcaRca (26-65 cm), où la terre fine devient carbonatée. La structure de l'horizon d'altération est massive-fondue et la texture argileuse. Le squelette (environ 25 %) est constitué de graviers, cailloux et pierres calcaires aux arêtes vives.

Les quatre profils sur dalle calcaire en place sont des sols minces, ou situés dans des fissures, et organiques. Ils subissent fortement l'influence de la roche calcaire, d'autant plus quand une réserve de carbonate est disponible sous forme de graviers, cailloux et pierres dans les profils (plus grande surface réactive). La dégradation de la matière organique est freinée par le calcium et celle-ci s'accumule dans les horizons de surface, leur conférant une teinte foncée. Cependant, les roches du Portlandien et du Kimmeridgien sont de nature dure et compacte et par conséquent difficilement altérables. De plus, les fragments calcaires sont souvent peu abondants dans les horizons de surface. En conséquence, la libération des ions calcium et carbonate est lente et ne parvient pas à contrer les processus de décarbonatation, entraînant l'apparition d'horizons Aci et Sci. Le tampon des carbonates devient insuffisant en surface et les pH commencent à s'abaisser. Ces sols semblent représenter « l'évolution typique » sur substrat calcaire dur, où la pédogenèse est dominée par les processus de décarbonatation et de décalcification. Cependant, la présence de graviers cristallins dans le profil BAL 6B et les signes de colluvionnement observables dans d'autres profils indiquent des processus de remaniement ayant eu lieu en surface.

De plus, l'épaisseur croissante des profils vers le bas de la toposéquence semble indiquer un transfert de matériaux le long du versant. Dans ce contexte, il est malaisé de déterminer l'origine autochtone, parautochtone, ou subautochtone de la terre fine. Pour cette raison, d'éventuelles discontinuités lithologiques n'ont pas été indiquées lors de la description des solums. Le recours aux analyses minéralogiques, granulométriques et géochimiques est nécessaire pour mieux comprendre l'origine des horizons superficiels.

### Les sols sur moraine calcaire

**Le profil BAL 3A** est un CALCOSOL humique décarbonaté en surface. Il se trouve en haut de versant, sur une faible pente ( $< 5^\circ$ ). Le profil a été creusé dans un talus au bord d'une route forestière. La litière est clairsemée et composée principalement de feuilles de hêtre et d'aiguilles d'épicéa. La séquence des horizons est la suivante: Aciho / Scah / Cca / Dca. L'horizon Aciho (0-10 cm) est limoneux et de structure micro-grumeleuse. Il est décarbonaté et son pH se situe entre 5 et 6. Il ne contient que 2 % de graviers et cailloux calcaires. Le squelette augmente dans l'horizon suivant, Scah (10-36 cm), où les graviers, cailloux et pierres calcaires représentent jusqu'à 40 % du volume. Cet horizon est qualifié d'humifère (teneur en Corg importante mais  $< 8 \text{ g / 100 g}$  de terre fine séchée; AFES, 2009). Il est également de texture limoneuse, mais est carbonaté et son pH est de 6-7. Dans ces deux premiers horizons, les racines de toute taille sont très abondantes. L'horizon d'altération Cca (36-52 cm) est irrégulier et forme des taches ou des langues qui descendent dans la moraine sous-jacente. Il est de texture limono-argileuse et son pH est de 7. Il ne contient plus que 20 % de squelette, qui est composé uniquement de graviers calcaires. La moraine carbonatée Dca (52-85 cm) est composée de 50 % de graviers, cailloux et pierres calcaires. La terre fine est limono-sableuse et de structure massive cimentée. Le pH est de 9 et il n'y a plus de racine observée.

**Le profil BAL 4A** est également un CALCOSOL humique décarbonaté en surface. La station est en pente faible et se trouve de nouveau sur un talus au bord de la route forestière. À cet endroit, la forêt est dominée par le hêtre, dont les feuilles constituent la litière clairsemée, accompagnées par quelques herbacées. La séquence d'horizons est la suivante: Aciho / Scah / ScaCca / Dca. L'horizon Aciho est mince (0-4 cm), de texture limoneuse et de structure microgrumeleuse subpolyédrique. Il est décarbonaté et son pH est de 6-7. Il contient entre 5 et 10 % de squelette (graviers et cailloux calcaires). L'horizon suivant, Scah (4-13 cm), est limoneux et de structure polyédrique. Son pH est de 6-7 également et il est carbonaté dès 10 cm de profondeur. Les racines de toute taille sont abondantes. Le squelette représente 20 % du volume, sous forme de graviers et cailloux calcaires. Il augmente dans l'horizon sous-jacent, ScaCca (13-29 cm), jusqu'à 40 %. Cet horizon est limono-argileux, a une structure polyédrique et un pH de 7. La transition avec la moraine carbonatée est nette et en forme de langues. L'horizon Dca (29-80 cm) contient 50 % de graviers, cailloux et pierres calcaires. Sa texture est sablo-limoneuse et sa structure est massive cimentée. Le pH est de 8-9.

Les deux profils de sol sur moraine entièrement carbonatée se ressemblent fortement. Les séquences d'horizons sont similaires et de type Aci / Sca / Cca / Dca. Les horizons de surface Aci et Sca ont une épaisseur totale qui varie d'un profil à l'autre. Bien que la litière à la surface des solums ne soit pas spécialement abondante, ces deux horizons sont riches en matière organique (couleur foncée des horizons), préservée de la minéralisation par une gangue de  $\text{Ca}^{2+}$ . Les horizons d'altération Cca progressent dans la moraine saine sous forme de langues ou en suivant les racines (apparition de taches brunes). La moraine elle-même est de composition similaire entre les deux sites étudiés. Elle est composée pour moitié de squelette (inférieur à 20 cm) et pour l'autre moitié d'un mélange de sables et de limons. Aucun bloc erratique (calcaire ou cris-

tallin) n'a été observé à proximité des profils étudiés. Ces sols sont dominés par le carbonate de calcium et sont en cours de décarbonatation. Par rapport aux sols sur dalle calcaire en place, les sols sur moraine carbonatée sont à peine moins organiques et seul l'horizon A est décarbonaté. Ceci est dû au fait que la recharge en calcaire est probablement plus efficace, grâce à l'état de fragmentation du squelette (plus grande surface de contact).

### Les sols sur moraine mixte

**Le profil BAL 5A** est un CALCISOL. Il se trouve au milieu du versant dans une pente de 20°, à une altitude de 1 040 m. La strate arborescente (hêtre, épicéa) est dense et le sous-bois très peu présent. À la surface du sol, une litière continue de feuilles de hêtre et d'aiguilles d'épicéa est observée. Le profil mesure 100 cm de profondeur et présente la séquence d'horizon suivante: Acih / Sci / IIScaCca / IIDca. L'horizon Acih (0-3 cm) et Sci (3-32 cm) se développent dans un dépôt fin de surface, contenant peu de squelette (5 % dans l'horizon Sci, composé de graviers et de cailloux calcaires et cristallins en proportions égales). La texture des deux horizons est limoneuse à limono-sableuse. Leur pH est de 5-6 et la terre fine est carbonatée à partir de 28 cm. De nombreuses racines de toute taille sont présentes. L'horizon IIScaCca (32-52 cm) est de texture limono-sableuse avec un pH de 6-7. Il contient 40 % de squelette, composé de graviers, cailloux, ainsi que de quelques pierres majoritairement calcaires, les éléments cristallins représentant 10 % du squelette. La moraine sous-jacente Dca (52-100 cm) est composée de 50 % de graviers, cailloux, quelques pierres et quelques blocs calcaires, aux arêtes émoussées. La terre fine est de texture limono-sableuse et le pH de 7.

**Le profil BAL 5B** est un CALCOSOL. Il est situé non loin du profil précédent, dans une pente de 20°. La situation, en contrebas d'un chemin forestier, n'exclut pas un éventuel apport récent de colluvions en surface. La forêt est dominée par les résineux à cet endroit et le sous-bois est épars. La litière au sol est discontinue et composée principalement d'aiguilles d'épicéa. Le profil mesure de 115 cm de profondeur et est entièrement carbonaté. Les horizons présentent la séquence Acaho / Sca / ScaCca / Cca / IIDca / IIIRca. L'horizon organo-minéral Acaho (0-17 cm) a une texture limono-sableuse et une structure grumeleuse subpolyédrique. Le pH est de 6-7 et du mycélium a été observé. Le squelette (10 %) est composé de graviers et cailloux mixtes anguleux, avec une dominance des éléments calcaires. L'horizon Sca (17-32 cm) a également une texture limono-sableuse et un pH de 7. Le squelette représente 15 % du volume et est toujours dominé par les éléments calcaires, sous forme de graviers, cailloux et pierres aux angles arrondis. L'horizon de transition ScaCca (32-54 cm) a une texture limono-sablonneuse et une structure polyédrique. Le pH est de 7-8. Le squelette augmente jusqu'à 30 % et la proportion d'éléments cristallins représente jusqu'à 50 % des graviers, cailloux et blocs. La même composition du squelette se retrouve dans l'horizon suivant Cca (54-75 cm). La texture est limono-sableuse, la structure devient particulaire et le pH est de 8. La moraine sous-jacente IIDca (75-115 cm) ne contient en revanche que des éléments calcaires, soit 50 % de graviers, cailloux et pierres aux angles arrondis. Par conséquent, ce dépôt morainique profond est différencié de celui de surface, qui est composé d'un mélange d'éléments calcaires et cristallins. La terre fine est sableuse et non structurée et le pH est de 8. La roche calcaire, probablement en place, est atteinte à partir de 115 cm (horizon IIIRca).

**Le profil BAL 7** est un NEOLUVISOL. Il est situé en bas du versant, sur une faible pente (< 5°). Des blocs erratiques cristallins sont présents aux alentours du profil. Les arbres (hêtre, épicéa) sont hauts et serrés et le sous-bois est très peu présent. La litière est continue et constituée

de branches, de feuilles de hêtre et d'aiguilles d'épicéa. Sept horizons ont été décrits selon la séquence suivante: A / S / E / BT / IISbCca / IIDx / IIIRca. Les quatre premiers horizons se développent dans un dépôt minéral entièrement décarbonaté et acide. Les horizons A (0-3 cm) et S (3-18 cm) ont une texture limono-sableuse et un pH de 5. Le squelette est peu abondant (< 5 %) et composé de graviers et cailloux mixtes. Les racines de toute taille sont nombreuses. L'horizon E (18-34 cm) est limono-sableux et présente une structure polyédrique massive. Il a un pH de 5 et les racines y sont peu abondantes. Il contient 20 % de squelette composé de graviers, cailloux, pierres et blocs uniquement cristallins. L'horizon BT (34-47 cm) est un horizon irrégulier en poches, de texture sablo-limoneuse et de structure polyédrique. La présence de revêtements argileux observés en lames minces a permis de mettre en évidence l'accumulation d'argiles dans cet horizon, résultant des processus de lessivage. Le pH est toujours de 5 et les racines sont rares. Le squelette (25 %) est dominé par les graviers cristallins altérés. La transition est distincte avec l'horizon IISbCca (47-83 cm) sous-jacent, représentant un horizon S enfoui de couleur plus foncée. La texture est limono-sablo-argileuse. La terre fine est carbonatée à partir de 72 cm de profondeur et le pH passe de 5 à 8 entre le haut et le bas de l'horizon. Le squelette représente 50 % du volume et est constitué de graviers mixtes (situés en bas de l'horizon), ainsi que de cailloux, pierres et blocs calcaires aux arêtes vives. La transition avec la moraine mixte sous-jacente est nette et de forme sinuée. L'horizon IIDx (83-108 cm) est de texture sableuse et de structure particulaire. Le pH est de 8-9 et quelques rares racines sont encore présentes. Le squelette (60 %) est composé de graviers, cailloux et pierres de compositions mixtes. Les éléments calcaires dominent (80 % du squelette) et présentent des arêtes émoussées. Une dalle calcaire est atteinte à partir de 108 cm de profondeur (horizon IIIRca). L>IDT du profil BAL 7 est de 1.48, ce qui justifie son rattachement aux NEOLUVISOLS.

**Le profil CHX** est un CALCOSOL cultivé recarbonaté en surface. Il se trouve en plaine, dans les pâturages au lieu-dit Les Chaux. Le champ est pâtré et fauché. L'hypothèse d'un chaulage a été émise, mais n'a pas pu être vérifiée auprès de l'exploitant. Ce champ n'est aujourd'hui plus labouré, mais il l'a été pendant de nombreuses années et l'influence est toujours présente sur la structure des horizons de surface. Les horizons ont été définis comme suit: LAca / LSca / IIDx / IIIJp / IVJp. L'horizon LAca (0-7 cm) a une texture limono-sableuse et une structure micro-grumeleuse mal exprimée. Le pH est de 6 et l'horizon est légèrement carbonaté. Les racines fines et moyennes sont abondantes. Le squelette est absent. L'horizon suivant LSca (7-30 cm) est de texture limono-sableuse également, à structure polyédrique. Le pH est de 6 et les racines fines sont moyennement abondantes. Quelques graviers mixtes et cailloux cristallins sont observés (2 % de squelette). La transition est très nette avec l'horizon sous-jacent. La limite est horizontale et forme des coulées par endroit. La moraine IIDx (30-100 cm) a une texture sablo-limoneuse et une structure particulaire. Le pH est de 8-9 et les racines fines sont rares. Le squelette représente 45 % du volume et est composé de graviers et cailloux mixtes, avec une dominance d'éléments calcaires (75 % du squelette). Dans le bas de l'horizon, des poches de sable présentant des taches d'oxydo-réduction sont observées. La transition est nette avec l'horizon IIIJp (100-112 cm), constitué de dépôts fluvio-glaciaires. De texture argilo-sableuse et de structure massive, il ne contient que 2 % de squelette, sous forme de graviers et cailloux mixtes. Le pH est de 8-9 et l'horizon est carbonaté. Les racines sont absentes. La transition avec le dernier horizon est très nette et marquée par des traînées ocre qui coulent sous la limite ondulée. L'horizon IVJp (112-130 cm) a une texture sableuse et une structure particulaire. Le pH est de 8-9 et quelques rares racines de taille moyenne sont présentes. Le squelette est absent. Cet horizon était humide lors de la description, alors que le reste du profil était très sec.

Ces quatre profils sur moraine mixte sont des sols profonds et complexes, issus de différents dépôts superposés. La composition des moraines est très variable, autant par la taille des éléments que par leur composition. En fonction de la proportion des éléments calcaires et cristallins, la pédogenèse peut être orientée vers différentes voies. Trois profils (BAL 5A, BAL 5B et CHX) se trouvent sous l'influence des processus de décarbonatation et de décalcification. De ce point de vue, ils pourraient ressembler aux profils décrits sur moraine entièrement carbonatée. Cependant, la présence de quelques graviers cristallins suffit à indiquer qu'il y a bel et bien eu un mélange avec une moraine d'origine alpine, d'où le rattachement à la catégorie des moraines mixtes. Le quatrième profil (BAL 7) est décarbonaté jusqu'à 72 cm de profondeur. Les conditions édaphiques sont plus acides que dans les trois autres sols et des processus de lessivage des argiles sont en cours. Ce solum semble issu de deux dépôts minéraux successifs séparés par un horizon S enfoui, dont le plus superficiel est entièrement composé d'éléments cristallins. Cependant, il est parfois difficile de différencier des dépôts morainiques superposés dus aux nombreuses avancées et reculées des glaciers. Dans certains cas, des ruptures lithologiques supplémentaires pourraient probablement être ajoutées.

### Le sol sur moraine cristalline

**Le profil BAL 6A** est vraisemblablement un ALOCRISOL TYPIQUE. Cependant, les analyses nécessaires pour confirmer le rattachement à cette référence n'ont pas été réalisées (dosage des ions  $\text{Al}^{3+}$ ). De plus, le critère concernant la structure de l'horizon Sal était difficilement observable au vu de la texture majoritairement sableuse de l'horizon. Le profil est situé dans le versant, sur une pente de 15°, à une altitude de 950 m. De nombreux blocs erratiques cristallins sont présents autour du profil. La strate arborescente est élevée et le sous-bois est clairsemé. La litière est continue et composée essentiellement de brindilles et de feuilles de hêtre. La séquence des horizons est la suivante: A / ASal / Sal / Ct / Dsi1 / Dsi2. La terre fine de tout le profil a une texture sablo-limoneuse et un pH de 4-5. Dans les horizons A (0-3 cm), ASal (3-14 cm) et Sal (14-65 cm), les racines fines et moyennes sont modérément abondantes. Le squelette représente 5 % des horizons A et ASal et 10 % de l'horizon Sal, sous forme de graviers et cailloux cristallins. L'horizon Ct (65-102 cm) n'exprime pas de structure reconnaissable. Les racines fines et moyennes sont rares. Le squelette, de même composition que les horizons supérieurs, atteint 20 % du volume de l'horizon. Un léger lessivage des argiles a été observé en lames minces, d'où la dénomination de l'horizon. Les deux horizons morainiques sous-jacents Dsi1 (102-114 cm) et Dsi2 (114-122 cm) contiennent 10 % de squelette, toujours sous forme de graviers et cailloux cristallins. Les racines fines et moyennes sont rares dans l'horizon Dsi1. Leur abondance augmente légèrement dans l'horizon Dsi2, qui a été différencié à cause de sa couleur plus foncée.

Contrairement aux profils précédents développés sur des moraines mixtes, le substrat morainique de BAL 6A est très constant de par sa composition et sa texture. Ces observations suggèrent que ce sol se développe dans un dépôt unique et homogène, mis à part les horizons superficiels où le squelette est moins abondant. L'acidité très prononcée du profil est due à l'absence totale d'éléments calcaires. Dans ces conditions, l'altération des silicates est favorisée et entraîne la libération de l'aluminium, qui joue alors le rôle de tampon dans la solution du sol (AFES, 2009). Le lessivage des argiles permet la formation de revêtements argileux dans l'horizon Ct. Cependant, le processus n'est pas très développé et le caractère actuel ou hérité de cette dynamique est incertain. En effet, une telle acidité des horizons de surface serait susceptible de provoquer l'acidolyse des phyllosilicates et s'opposerait de la sorte à leur migration.

#### **4.1.3. Synthèse**

Sur le total de 23 profils décrits sur les deux sites d'étude, 7 types de sol différents ont été déterminés. La moitié des profils décrits (11 sur 23) sont identifiés comme des CALCOSOLS et des CALCISOLS. Ces rattachements reflètent l'influence du calcaire sur le développement des horizons et sur les processus pédologiques, influence également visible par la présence du squelette calcaire régulièrement distribué dans les 11 profils. Dix profils semblent au contraire engagés dans une voie d'évolution acide (profils de type BRUNISOL et NEOLUVISOL), du moins dans leurs horizons de surface issus d'un matériel parental décarbonaté. Une rupture lithologique existe alors entre les horizons superficiels et profonds. Ces derniers sont carbonatés et se trouvent quant à eux sous l'influence des roches calcaires en place ou remaniées (par exemple dans les moraines carbonatées ou mixtes). Finalement, deux profils de sol font figure d'exception dans les sites d'étude : un ORGANOSOL INSATURÉ et un ALOCRISOL TYPIQUE. L'ORGANOSOL INSATURÉ résulte de l'accumulation de matière organique causée par un microclimat froid et humide, couplée à la faible abondance de la fraction minérale disponible (faible taux de résidu insoluble contenu dans la roche calcaire encaissante). L'ALOCRISOL TYPIQUE reflète quant à lui des conditions particulières liées au substrat entièrement décarbonaté et acide (moraine alpine décarbonatée), bien que le rattachement à ce type de sol devrait encore être confirmé par des analyses supplémentaires (taux d'aluminium échangeable).

À cette diversité des types de sols rencontrés s'ajoute une forte variabilité spatiale le long des deux toposéquences étudiées. Cette variabilité est particulièrement visible sur le site de Ballens, où plusieurs types de sols montrant parfois des voies d'évolution différentes peuvent être observés sur une seule station (altitude identique). Ces profils, parfois éloignés de quelques centaines de mètres seulement, se situent sur le même versant et sont donc soumis à des conditions climatiques générales identiques. La diversité des profils décrits reflète dans ce cas la variabilité de la couverture sédimentaire, alors que le substrat lithologique peut être considéré comme homogène dans une station.

Parmi les divers processus pédologiques mis en lumière au travers de la description et la dénomination des sols, le lessivage des argiles pose parfois un problème d'identification. En effet, d'après les observations de terrain, seuls deux profils comprennent un horizon BT typique des NEOLUVISOLS (AMB 7 et BAL 7). Les analyses granulométriques ont permis de confirmer ces rattachements grâce à l'indice de différenciation texturale (IDT ; AFES, 2009). Cependant, les observations de lames minces ont révélé la présence de revêtements argileux dans la porosité de nombreux profils appartenant majoritairement à la catégorie des BRUNISOLS (AMB 4, 5A, 6, 8B, BAL 2 et 3C ; annexes fiches pédologiques et § 4.3.1. plus loin), mais également dans l'ALOCRISOL TYPIQUE (BAL 6A) et dans un CALCISOL (BAL 6B). À l'échelle microscopique, il apparaît que les processus de lessivage et d'accumulation des argiles dans la porosité ne sont pas cantonnés aux NEOLUVISOLS, mais concernent pratiquement la moitié des profils étudiés (10 sur 23). En revanche, les critères macroscopiques (présence d'un horizon BT) ou texturaux ne sont que plus rarement exprimés dans les profils et dépendent de l'intensité du processus de lessivage. Dans certains sols où l'intensité est moyenne (décelable par une faible différenciation texturale par exemple), les profils présentent un horizon St ou Ct et sont qualifiés de « luvique » (AMB 6, BAL 2, BAL 6A).

## 4.2. Résultats analytiques

### 4.2.1. Site des Amburnex

Les résultats des analyses de pH H<sub>2</sub>O, la composition minéralogique totale et celle de la fraction argileuse, ainsi que la distribution granulométrique des échantillons provenant des profils de sol des Amburnex sont présentés dans la figure 4.3. Les données chiffrées se trouvent en annexe, de même que les résultats traitant de la minéralogie de la fraction 2-16 µm, qui ne sont pas commentés ici. Les principales caractéristiques des dix profils du site des Amburnex sont brièvement décrites ci-dessous, en fonction du type d'analyse. Les descriptions suivent une logique de bas en haut des solums, en partant des matériaux géologiques pour finir aux horizons de surface.

#### pH H<sub>2</sub>O

Les valeurs de pH sont basiques (entre 7.4 et 8.4) dans les horizons profonds de tous les profils de sol. Au contact avec la roche-substrat calcaire, les échantillons sont fortement influencés par les réactions de dissolution du carbonate de calcium (rôle de tampon joué par les carbonates). L'horizon profond du profil AMB 2 présente une légère acidité (pH 6.8), probablement due à l'abondante présence de matière organique. Dans tous les profils, le pH décroît en allant vers la surface. Des valeurs minimales de 4.4 et 4.8 sont atteintes dans les échantillons AMB2 0-5 cm et AMB7 15-20 cm, respectivement. Dans les autres solums, les valeurs de pH mesurées dans les horizons de surface varient entre 5 et 6.5. L'évolution du pH dans les profils se fait soit de façon progressive (profils AMB 1 et AMB 3), soit de manière abrupte par un écart de pH d'une ou deux unités (profils AMB 4 à AMB 9).

#### Minéralogie totale (RT)

Les roches calcaires, ainsi que la terre fine de la moraine carbonatée, sont composées de 80 à 99 % de calcite. Ce même minéral représente entre 40 et 60 % des marnes analysées (AMB 4, AMB 5A et AMB 6). Les marnes d'Arzier situées au fond du profil AMB 6 contiennent également 34 % de dolomite (ou ankérite). La fraction résiduelle des matériaux calcaires est composée de phyllosilicates, de quartz et d'une fraction indosée. Les horizons profonds des solums sont également carbonatés (< 30 %), mais la proportion de calcite diminue inversement à la profondeur. Par conséquent, les phyllosilicates et le quartz présentent un enrichissement relatif dans ces mêmes échantillons. Dans les horizons profonds du profil AMB 6, la dolomite disparaît progressivement en se rapprochant de la surface, au profit de la calcite. Les échantillons de surface de tous les profils sont décarbonatés et contiennent de grandes quantités de quartz (20-60 %) et de phyllosilicates (15-40 %). L'évolution du rapport entre le quartz et les phyllosilicates au sein des profils semble indiquer un enrichissement préférentiel en quartz dans les horizons de surface. La fraction indosée augmente généralement dans les horizons superficiels des profils étudiés. De fortes proportions de cette fraction peuvent être attribuées à l'accumulation de matière organique (profils AMB 1, AMB 2) ou à la présence d'oxy-hydroxydes de fer mal cristallisés (profil AMB 7). Des produits amorphes résultant de l'altération des phyllosilicates peuvent également contribuer à la fraction indosée. De faibles quantités de feldspath potassiques (feldspath-K) et de plagioclases sodiques (plagioclase-Na) sont présentes dans les échantillons de surface des profils.

#### Minéralogie < 2 µm

La fraction décarbonatée des matériaux calcaires présente des spécificités en fonction des niveaux lithologiques. Les roches du Berriasien (profils AMB 2 à AMB 5) contiennent jusqu'à

45 % de kaolinite, accompagnée par des micas et des smectites. Les interstratifiés illite-smectite (IS1 et IS2) et la chlorite sont présents en faibles quantités. En revanche, la smectite domine (< 70 %) dans les roches du Valanginien (profils AMB 6 à AMB 9). Les micas et les interstratifiés illite-smectite sont également présents, de même que de faibles proportions de kaolinite et de chlorite dans certaines roches valanginiennes. Les échantillons profonds des profils de sol, ainsi que les échantillons prélevés dans les fissures de la roche (profils AMB 7 et AMB 8A), reflètent fidèlement la composition de la roche sous-jacente. En revanche, les échantillons de surface montrent une nette évolution de leur fraction résiduelle. Les smectites et les micas diminuent en se rapprochant de la surface, alors que les intergrades illite-vermiculite (IV et IV-Al-Fe) apparaissent, produits par l'altération pédogénique des phyllosilicates et des silicates primaires. Les proportions d'interstratifiés illite-smectite et de kaolinite restent stables. La chlorite montre quant à elle une augmentation dans les échantillons de surface des sols. Dans les horizons superficiels des profils AMB 6, AMB 8A et AMB 8B, de faibles quantités de kaolinite sont observables, alors que ce minéral est absent des couches profondes.

### Granulométrie

Les courbes granulométriques des résidus insolubles des roches calcaires présentent des distributions presque unimodales, dominées par un mode limoneux très fin aux alentours de 7-8  $\Phi$  (4-8  $\mu\text{m}$ ). Des populations de sables fins (entre 4-5  $\Phi$ ; 32-64  $\mu\text{m}$ ) et de sables grossiers (1  $\Phi$ ; 500  $\mu\text{m}$ ) sont parfois présentes en faibles proportions. Les courbes granulométriques des horizons profonds des profils de sol montrent en général des similitudes avec les roches sous-jacentes. Cependant, bien que les mêmes populations de grains soient présentes (modes identiques), les proportions des différentes populations varient entre les échantillons. Les horizons de surface présentent quant à eux des courbes granulométriques nettement plurimodales. De plus, les « signatures » de ces échantillons sont fortement similaires au sein de chaque profil de sol, indiquant un dépôt superficiel homogène clairement différencié des horizons profonds. Les modes correspondants aux sables fins (3-4  $\Phi$ ; 63-125  $\mu\text{m}$ ) et grossiers (1  $\Phi$ ) montrent une augmentation par rapport aux couches profondes des solums. Cet accroissement est particulièrement marqué dans les horizons superficiels (0-5 cm de profondeur) des profils AMB 3 à AMB 9. Le mode correspondant aux limons fins (7-8  $\Phi$ ) est toujours présent dans les horizons de surface, mais semble se décaler vers des tailles légèrement plus grossières (6-7  $\Phi$ ; 8-16  $\mu\text{m}$ ). Une fraction argileuse (environ 10  $\Phi$ ; 1  $\mu\text{m}$ ) est également observable dans les échantillons superficiels de la majorité des solums. Le profil AMB 1 est le seul à présenter des courbes granulométriques similaires pour toutes les profondeurs.

En résumé, une tendance analogue est observée dans tous les profils de sol des Amburnex (exception faite du profil AMB 2). Les horizons profonds, issus de l'altération du matériau calcaire, ressemblent fortement aux roches sous-jacentes. Ils sont carbonatés, présentent des pH élevés et la composition minéralogique de leur fraction argileuse est essentiellement influencée par le substrat lithologique (abondance de kaolinite ou de smectite en fonction des différents bancs calcaires). En revanche, ces échantillons ne présentent pas de courbes granulométriques très homogènes au sein de chaque profil. Une rupture souvent nette sépare les couches profondes des horizons superficiels. Elle est particulièrement visible au regard des valeurs de pH, de l'évolution de la minéralogie des argiles en fonction de la profondeur et des distributions granulométriques. Les échantillons de surface de tous les profils présentent des caractéristiques similaires. Ils sont décarbonatés et leur pH est acide. La fraction argileuse est transformée par les processus d'altération (présence des IV et IV-Al-Fe) et enrichie en chlorite. Finalement, les courbes granulométriques montrent une forte similitude des distributions au sein des horizons

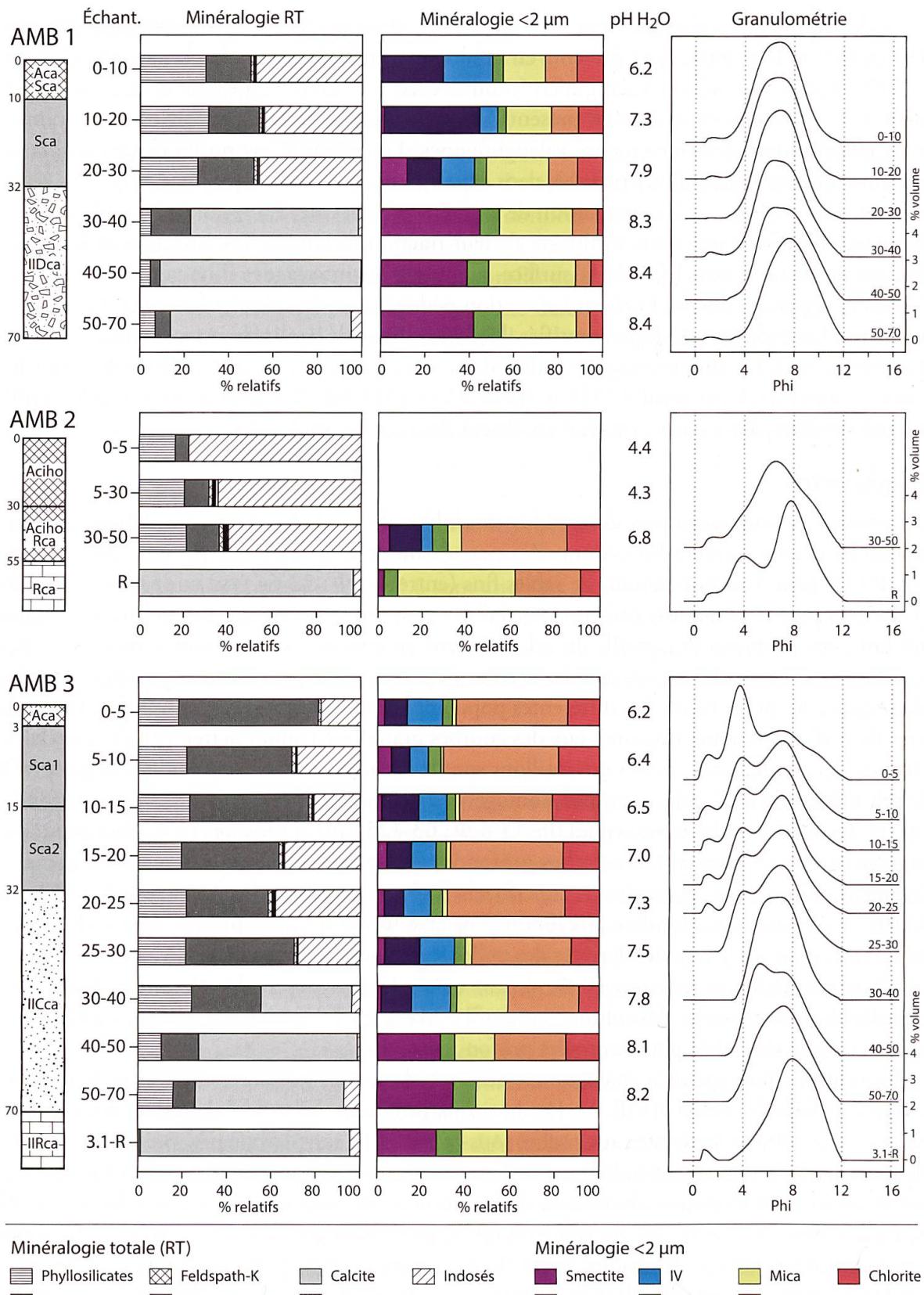


Figure 4.3. Résultats analytiques des échantillons provenant des profils de sol du site des Amburnex. Les profils de sol et les horizons déterminés (AFES, 2009) sont représentés schématiquement. Les échantillons analysés sont identifiés par leur profondeur (en cm). La composition minéralogique de la fraction totale et de la fraction décarbonatée < 2 µm, le pH H<sub>2</sub>O et la distribution granulométrique du résidu insoluble sont représentés pour chaque échantillon analysé.

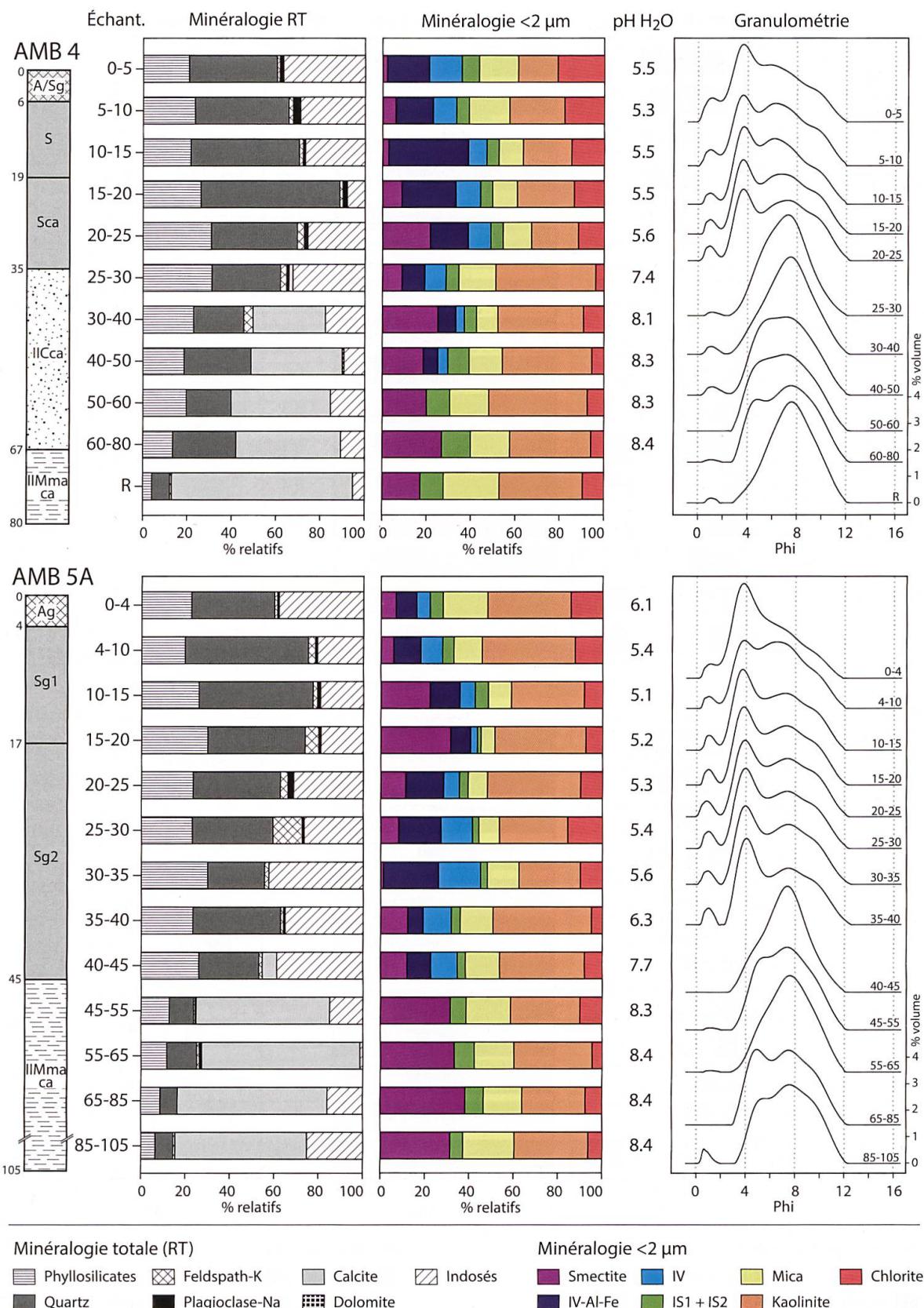


Figure 4.3 (suite)

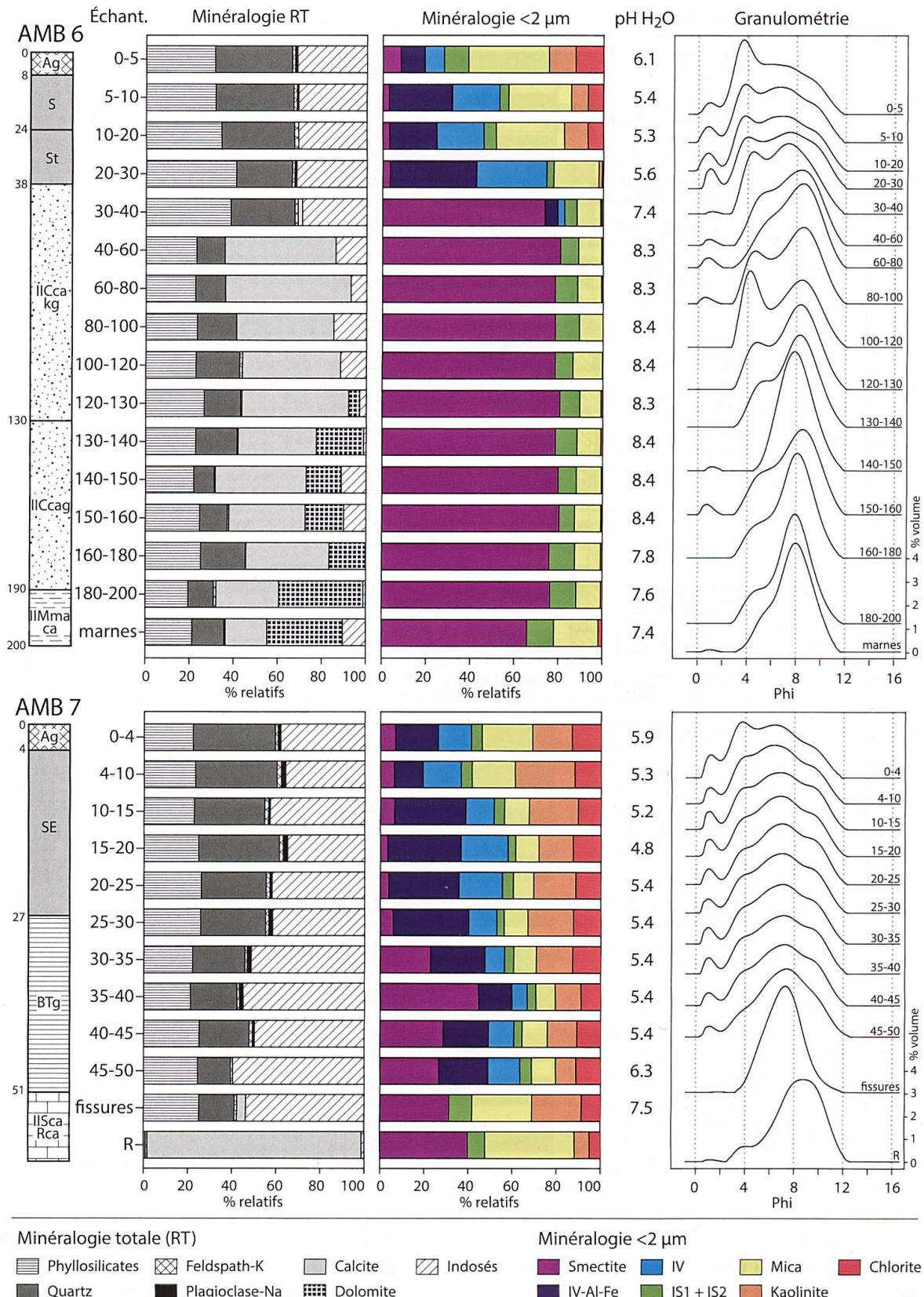


Figure 4.3 (suite)

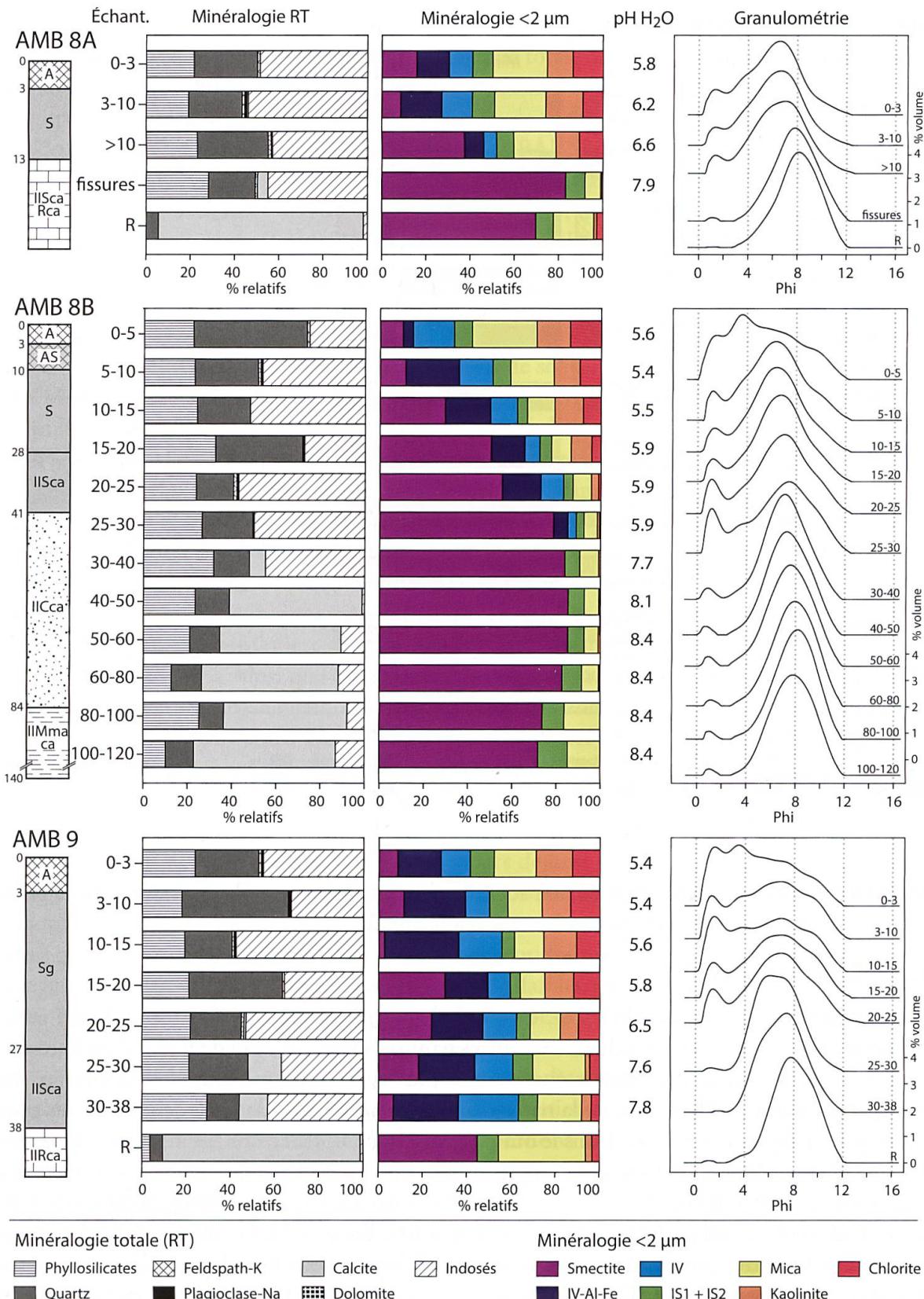


Figure 4.3 (suite)

## Autres roches prélevées dans les profils

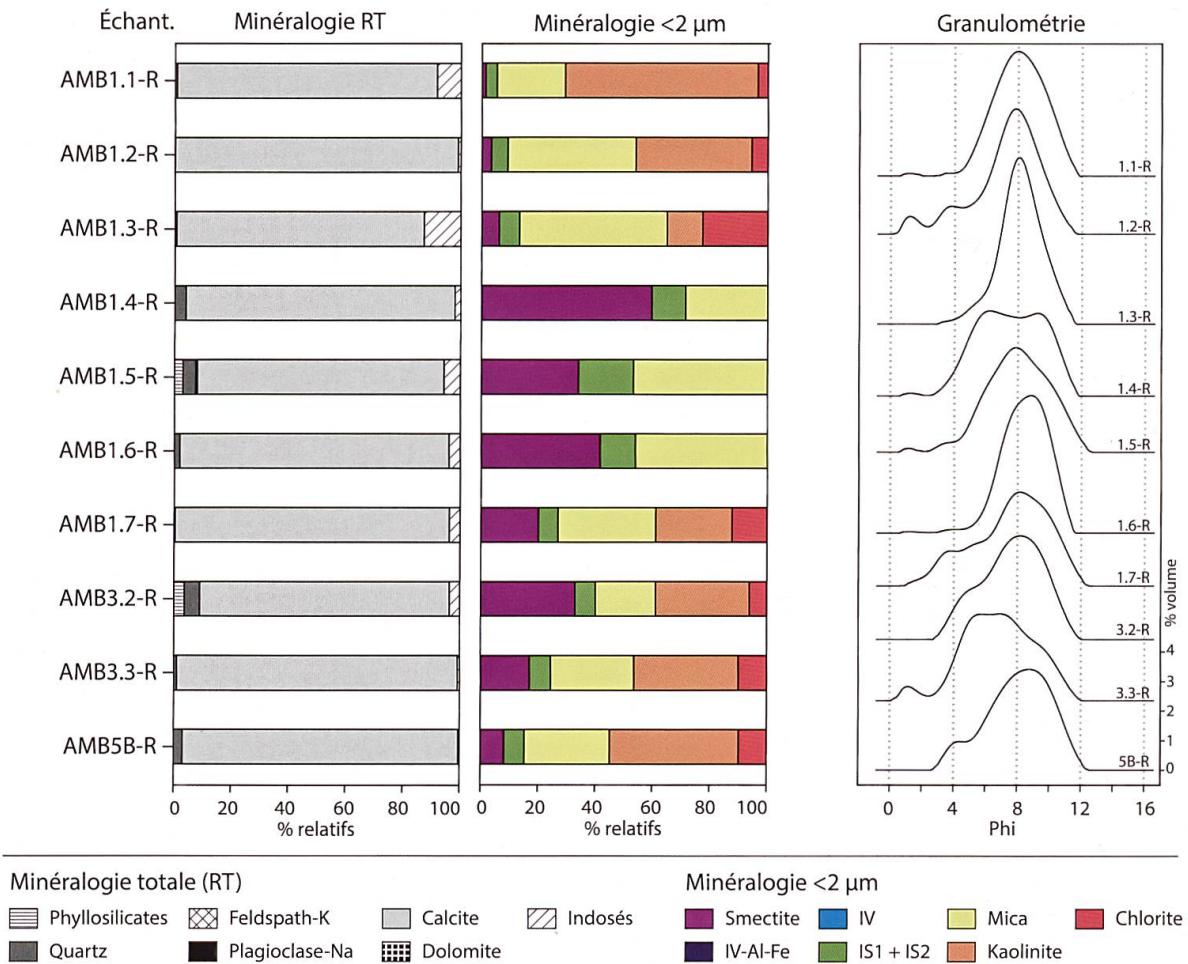


Figure 4.3 (suite)

de surface de chaque profil, ainsi qu'une augmentation de la proportion des sables fins et grossiers par rapport aux horizons profonds.

### 4.2.2. Site de Ballens

Les résultats des analyses de pH H<sub>2</sub>O, de minéralogie (roche totale et fraction < 2 µm) et de granulométrie réalisées sur les échantillons provenant des profils du site de Ballens sont présentés à la figure 4.4. Les treize solums étudiés sont plus complexes que ceux des Amburnex, au regard des séquences d'horizons, de la nature des différents dépôts identifiés, ainsi que des processus pédologiques dominants. Dans le but de rendre la compréhension des résultats plus aisée, il a été choisi de décrire les données non pas en fonction du type d'analyse, mais au travers des cinq unités de substrat décrites au § 4.1. Les résultats des analyses géochimiques présentent un exemple de profil de sol pour chacune de ces cinq unités (figure 4.5). Les données géochimiques concernant les autres profils analysés se trouvent en annexe. Pour finir, les résultats concernant le carbone organique total (TOC) donné par l'analyse RockEval et les cations extraits à l'eau dosés par chromatographie ionique sont brièvement décrits (résultats en annexe).

#### Les sols sur lœss remobilisé (profils BAL 2 et BAL 3C)

Dans les deux profils de sol, les valeurs de pH sont basiques (7.8-7.9) dans les échantillons profonds au contact de la roche calcaire. Puis, le pH diminue progressivement (BAL 3C) ou abrupt-

tement (BAL 2) en remontant en direction de la surface des solums, pour atteindre des valeurs situées entre 5 et 5.2. La composition minéralogique totale des roches situées au fond des profils est constituée de > 80 % de calcite. La fraction résiduelle est quant à elle composée de quartz et de phyllosilicates, ainsi que de très faibles quantités de feldspath-K dans la roche BAL2-R. Dans les deux profils, les horizons profonds de transition (BAL2 30-40 cm et BAL3C 30-50 cm) sont encore carbonatés (< 45 % de calcite). Les horizons de surface, entièrement décarbonatés, sont majoritairement composés de quartz (entre 45 et 55 %), de phyllosilicates (entre 25 et 40 %) et de la fraction indosée. Les feldspaths potassiques et les plagioclases sodiques représentent individuellement entre 2 et 6 % des échantillons de surface. La composition minéralogique de la fraction argileuse est similaire dans les deux roches calcaires. Elle est dominée par les micas et la kaolinite, accompagnés des smectites, des interstratifiés illite-smectite et de la chlorite en faibles quantités. La composition des échantillons de sol est relativement homogène au travers des deux profils étudiés. Les proportions de mica, d'interstratifiés illite-smectite et de smectite diminuent en se dirigeant vers la surface, au profit des intergrades illite-vermiculite (IV et IV-Al-Fe). La quantité de kaolinite reste constante à travers les profils, alors que la chlorite augmente dans les échantillons de surface. Les courbes granulométriques des résidus insolubles des roches sont semblables. Elles sont constituées de trois populations de grains, dont les modes se situent à 1, 6 et 10  $\Phi$  (correspondant respectivement à 500, 16 et 1  $\mu\text{m}$ ). Les distributions granulométriques des échantillons de sol sont composées de modes identiques à ceux identifiés dans les roches calcaires, mais la population de limons fins (6  $\Phi$ ; 16  $\mu\text{m}$ ) devient dominante. La composition géochimique totale du profil BAL 2 montre que la roche calcaire contient principalement du Ca, ainsi que du Sr en faible proportion. De petites quantités de Si, Al, Fe, Mg, K, Ti et Mn sont également détectées. Dans les horizons de surface, Si, Al et Fe dominent la composition géochimique. Un enrichissement en Ti est observé, alors que les proportions de Ca et de Sr diminuent drastiquement. L'échantillon BAL2 20-30 cm présente une légère augmentation en Al et en Fe, qui pourrait être liée à une plus forte proportion de phyllosilicates (probablement causé par le lessivage des argiles).

Ces deux profils se développant dans des dépôts de lœss remobilisés présentent des caractéristiques similaires, tant du point de vue de la composition minéralogique que de la distribution granulométrique. La présence de feldspath potassique, de plagioclase sodique (fraction totale), ainsi que de chlorite (fraction < 2  $\mu\text{m}$ ) dans les échantillons de surface est attribuée à un apport exogène, car ces minéraux ne se retrouvent qu'en faibles proportions dans la roche calcaire sous-jacente. La même constatation peut être faite au regard de la composition géochimique du profil BAL 2, montrant un enrichissement en éléments « exogènes ». En revanche, si les signatures granulométriques des échantillons de sol et de roche ne permettent pas l'identification de discontinuités lithologiques franches entre les distributions des lœss et la roche calcaire, elles soulignent néanmoins une évolution dans les proportions des différentes classes modales.

### **Les sols sur roche calcaire en place (profils BAL 1, BAL 3B, BAL 4B et BAL 6B)**

Dans les quatre profils considérés, les valeurs de pH sont basiques (7.0-7.7) dans les échantillons provenant du fond des profils et diminuent progressivement en direction de la surface pour atteindre des valeurs situées entre 5.9 et 6.8, en fonction des solums. Les roches situées au fond des profils présentent une composition minéralogique totale dominée par la calcite (entre 70 et 99 % en fonction des roches). De la dolomite (16 %) est également présente dans la roche BAL1-R (voir § 4.2.3. pour la description des substrats lithologiques). Les échantillons de sol sont quant à eux généralement décarbonatés (< 1 % calcite) et composés de quartz, de phyllosilicates et d'une fraction indosée (liée à l'accumulation de matière organique) en proportion

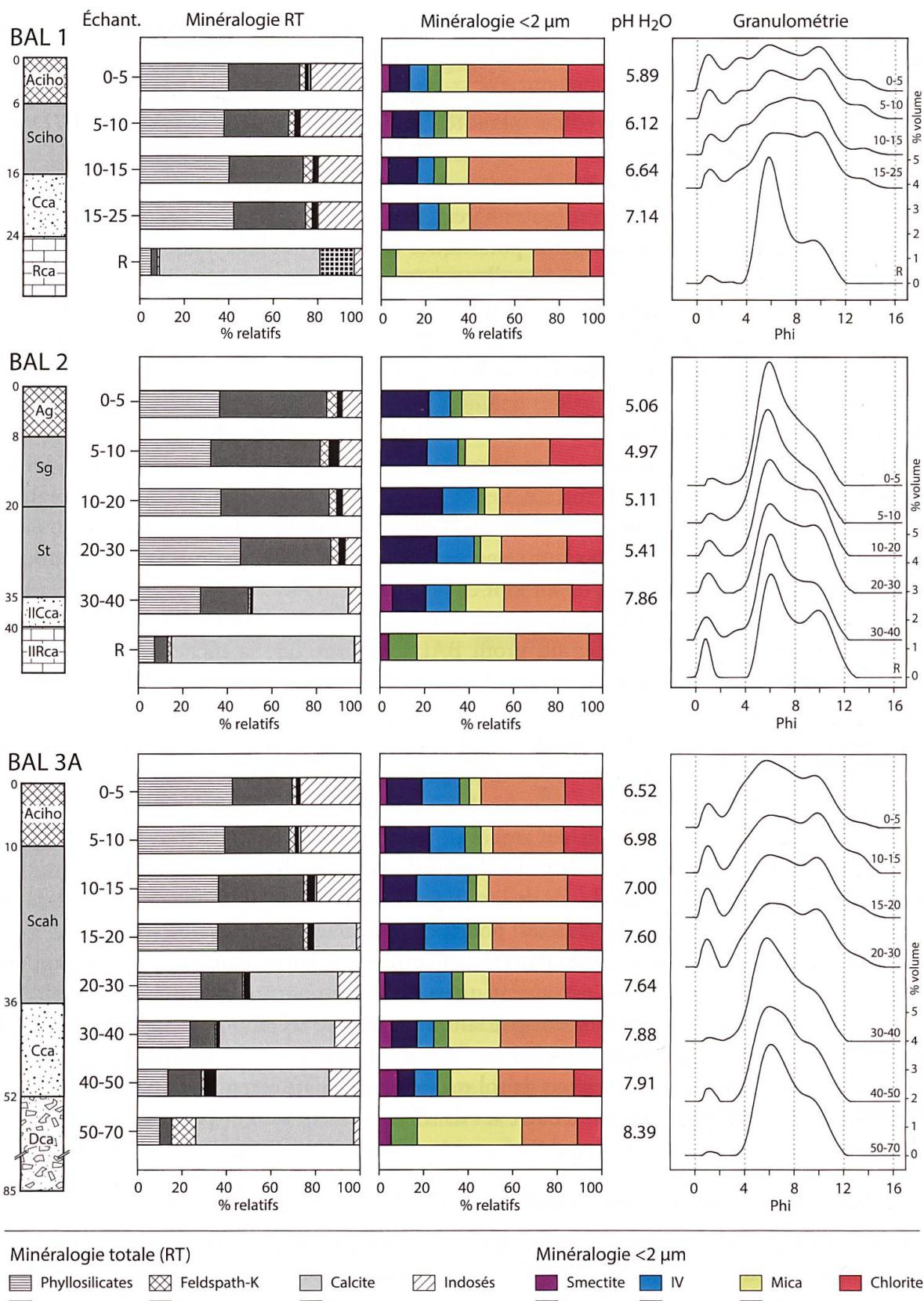


Figure 4.4. Résultats analytiques des échantillons provenant des profils de sol du site de Ballens. Les profils de sol et les horizons déterminés (AFES, 2009) sont représentés schématiquement. Les échantillons analysés sont identifiés par leur profondeur (en cm). La composition minéralogique de la fraction totale et de la fraction décarbonatée <2 µm, le pH H<sub>2</sub>O et la distribution granulométrique du résidu insoluble sont représentés pour chaque échantillon analysé.

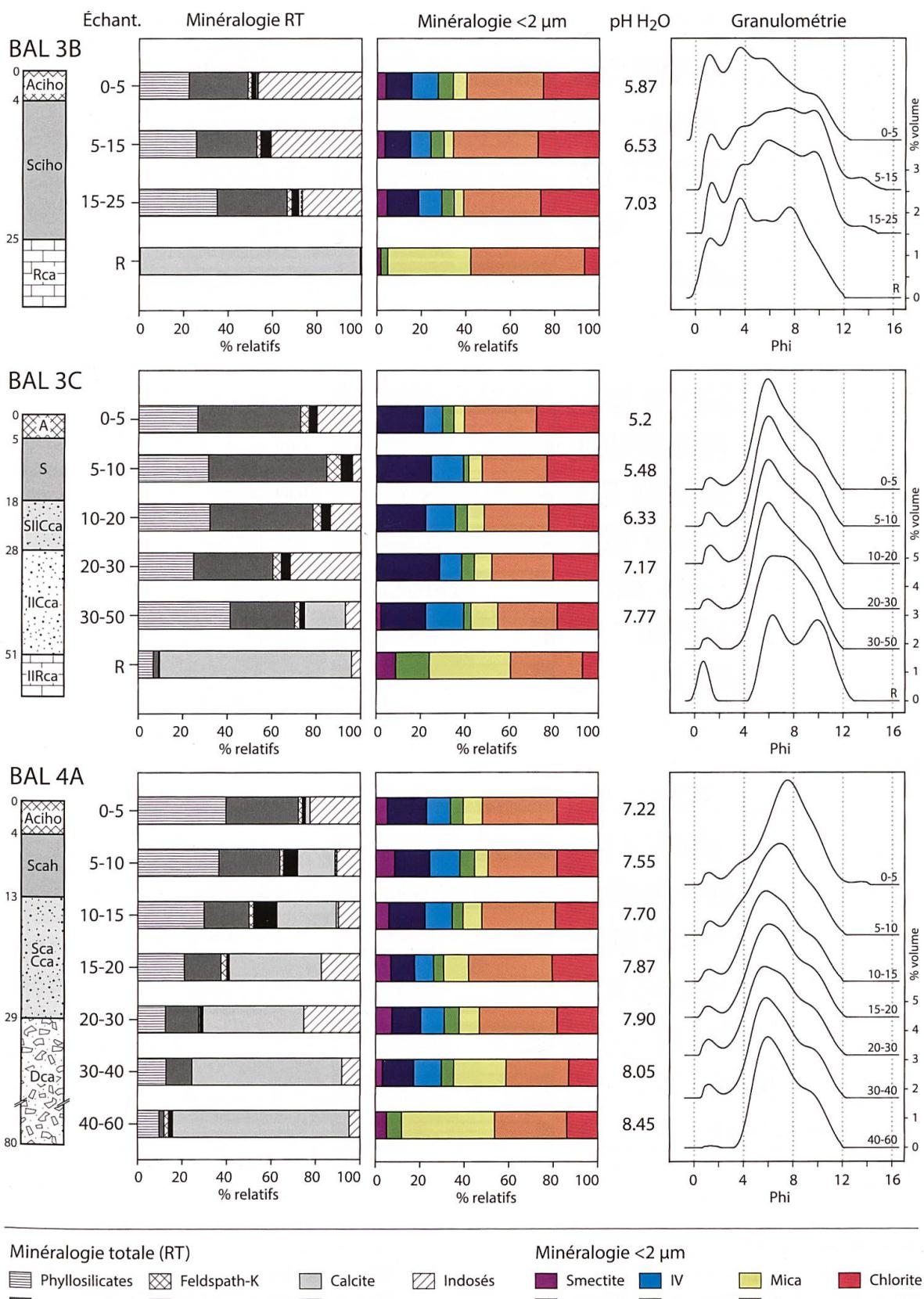


Figure 4.4 (suite)

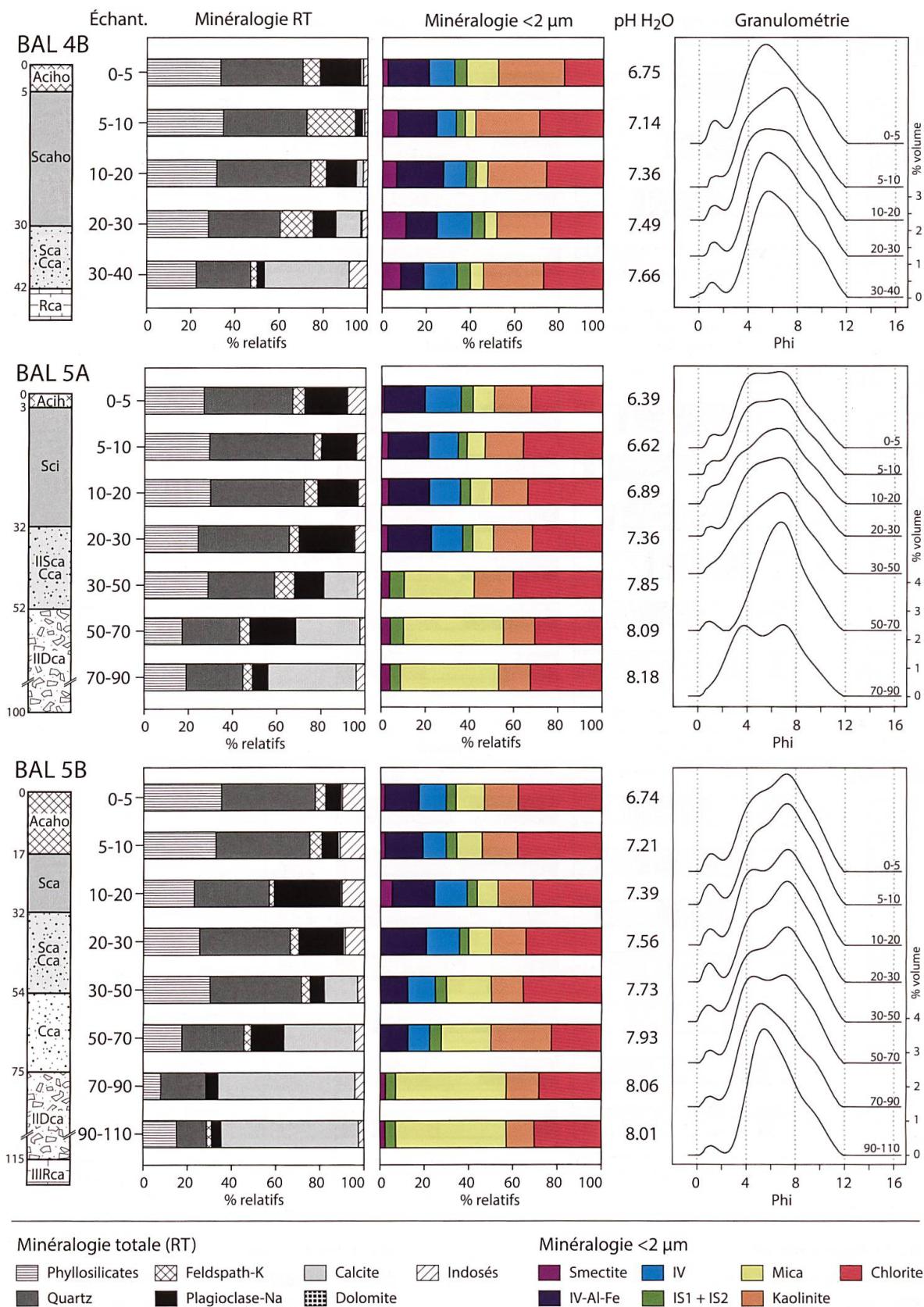


Figure 4.4 (suite)

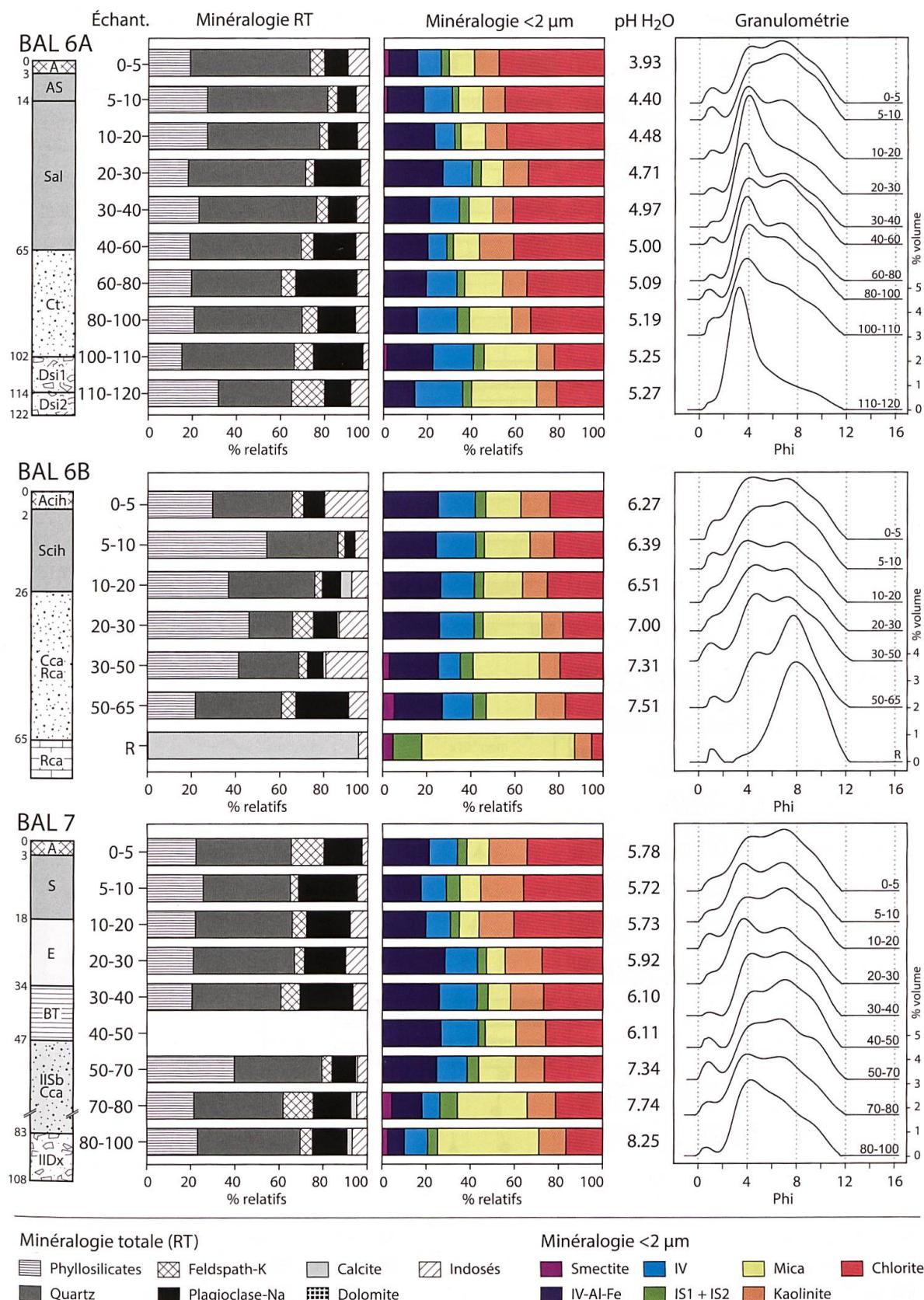


Figure 4.4 (suite)

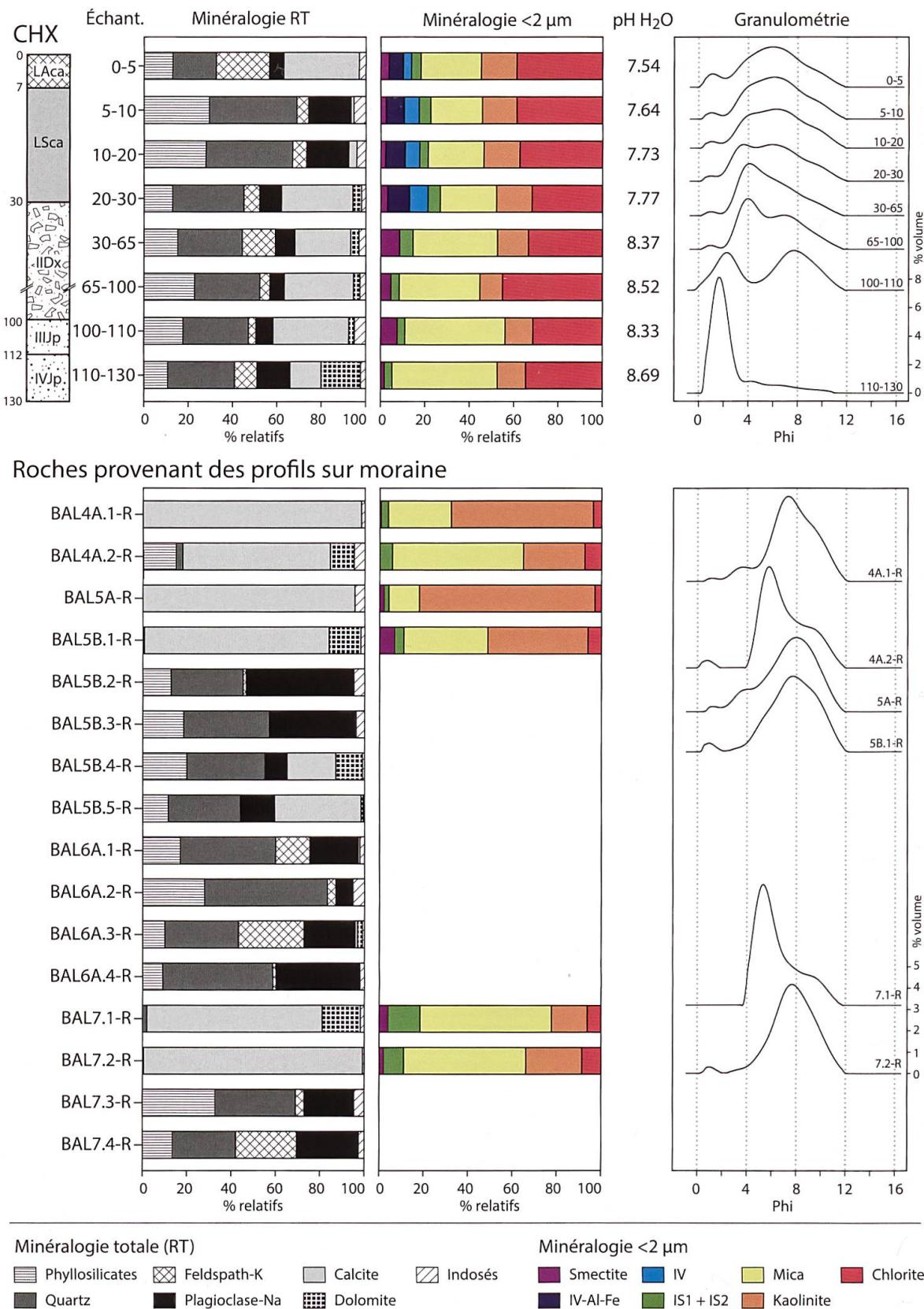
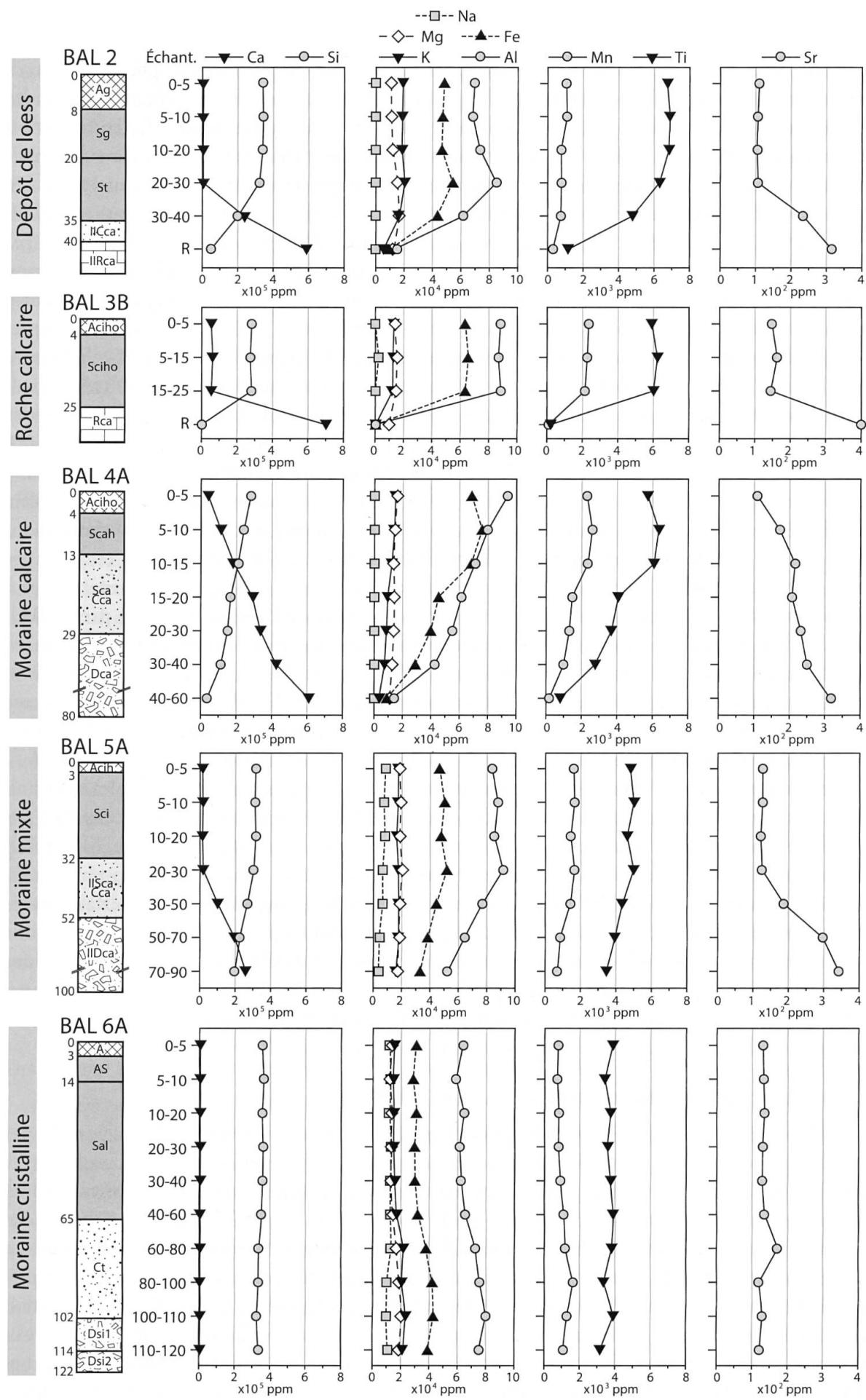


Figure 4.4 (suite)

Figure 4.5 (ci-contre). Composition géochimique (fraction totale) de cinq profils de sol de la toposéquence de Ballens correspondant aux cinq unités de substrat décrites. Les profils de sol et les horizons déterminés (AFES, 2009) sont représentés schématiquement et les échantillons analysés sont identifiés par leur profondeur (en cm).



variable. Les feldspaths potassiques et les plagioclases sodiques sont également présents dans ces échantillons. Ils sont plus abondants dans les profils BAL 4B et BAL 6B, où ils peuvent atteindre des proportions respectives de 22 et 24 %, que dans les deux autres profils. La composition minéralogique de la fraction granulométrique argileuse des roches est principalement constituée de mica et de kaolinite en quantités différentes en fonction des trois roches analysées. De la smectite, des interstratifiés illite-smectite et de la chlorite sont également présents en faibles proportions. Dans les échantillons de sol, les intergrades illite-vermiculite (IV et IV-Al-Fe) deviennent abondants (particulièrement dans le profil BAL 6B). Les proportions de kaolinite restent constantes ou augmentent (profil BAL 1), de même que la chlorite, qui peut représenter jusqu'à 30 % de la fraction < 2 µm résiduelle des échantillons. Les courbes granulométriques du résidu insoluble des roches sont très différentes les unes des autres. La roche BAL1-R montre une domination du mode 6 Φ (16 µm), accompagné par deux modes à 10 et 1 Φ (respectivement 1 et 500 µm). La signature de la roche BAL3B-R est plurimodale et jusqu'à cinq modes peuvent être identifiés: 1, 3.5, 6, 8 et 10 Φ, correspondant respectivement à des valeurs de 500, 88, 16, 4 et 1 µm. Dans la roche BAL6B-R, la distribution granulométrique du résidu insoluble est dominée par un mode à 8 Φ (4 µm), accompagné par une faible quantité de sables grossiers (mode à 1 Φ ; 500 µm). Les échantillons de sol présentent quant à eux des courbes relativement similaires au sein de chaque profil. Dans le profil BAL 3B, une certaine variation est observée entre les échantillons. Cependant, les modes granulométriques principaux sont identiques à ceux présents dans la roche sous-jacente, mais en proportions différentes. Dans les profils BAL 1 et BAL 6B, les courbes granulométriques des échantillons de sol montrent un enrichissement relatif en sables grossiers (mode 1 Φ ; 500 µm) et fins (mode 3-4 Φ ; 63-125 µm). Pour finir, les distributions granulométriques des échantillons du profil BAL 4B sont dominées par une fraction limoneuse fine (6 Φ ; 16 µm), accompagnée par de moindres quantités d'argiles (mode 10 Φ ; 1 µm) et de sables grossiers (mode 1 Φ ; 500 µm). La composition géochimique du profil BAL 3B indique que la roche-substrat contient majoritairement du Ca, avec de faibles quantités de Mg et de Sr. Une transition nette est observée avec les échantillons de sol et s'exprime par une forte diminution du Ca et du Sr, ainsi que par un enrichissement en Si, Al, Fe, Mn et Ti.

Ces quatre profils de sol, paraissant relativement semblables sur le terrain, se révèlent en réalité différents au regard des analyses minéralogiques et granulométriques. Certains paramètres (par exemple le pH ou certains modes granulométriques précis) semblent indiquer une continuité entre la roche sous-jacente et le sol, alors que d'autres (par exemple les proportions de feldspath-K, de plagioclases-Na, de chlorite ou d'autres modes granulométriques spécifiques, ainsi que la composition géochimique du profil BAL 3B) pourraient révéler au contraire la présence de discontinuités lithologiques entre le sol et la roche calcaire.

### Les sols sur moraine calcaire (profils BAL 3A et BAL 4A)

Dans les deux profils de sol se développant dans des moraines carbonatées, les valeurs de pH mesurées sont toujours > 6.5. Ces valeurs sont de 8.4-8.5 dans les échantillons profonds de chaque profil et diminuent progressivement dans les horizons supérieurs. La composition minéralogique de la fraction totale est dominée par la calcite (entre 70 et 80 %) dans les échantillons profonds représentant les moraines les moins altérées. Des quantités variables de phyllosilicates, de quartz, de feldspath potassique, de plagioclase sodique et de la fraction indosée sont présentes dans les moraines des deux sites. En remontant vers la surface des profils, la proportion de calcite diminue progressivement, alors que les phyllosilicates et le quartz augmentent relativement. Les échantillons de surface sont décarbonatés (profil BAL 3A) ou faiblement carbonatés (profil BAL 4A). La fraction indosée est importante (20-30 %) et principalement liée à

l'accumulation de matière organique. Le quartz et les phyllosilicates représentent la plus grande part des échantillons, accompagnés par de faibles quantités de feldspath-K et de plagioclase-Na. La composition minéralogique de la fraction granulométrique argileuse est similaire dans les deux échantillons profonds, où les micas et la kaolinite dominent. La chlorite, les interstratifiés illite-smectite et la smectite sont également présents en proportions moindres. Les quantités d'intergrades illite-vermiculite, de kaolinite et de chlorite augmentent graduellement vers la surface des solums, alors que les micas diminuent. Les smectites et les interstratifiés illite-smectite se retrouvent quant à eux en proportions constantes dans tous les échantillons. Les courbes granulométriques du résidu insoluble des deux moraines sont identiques. Elles sont dominées par un mode situé entre 6 et 7  $\Phi$  (8-16  $\mu\text{m}$ ), accompagné d'un mode argileux (10  $\Phi$ ; 1  $\mu\text{m}$ ) et de très faibles proportions de sables grossiers (mode à 1  $\Phi$ ; 500  $\mu\text{m}$ ). Les échantillons profonds des profils de sol ressemblent fortement aux moraines peu altérées. Dans le profil BAL 3A, une rupture au sein des distributions granulométriques est observée à 30 cm de profondeur. Les échantillons de surface présentent des courbes similaires, enrichies en sables grossiers et en argiles par rapport aux horizons profonds. Le mode situé entre 6 et 7  $\Phi$  est toujours présent mais affiche des proportions moindres, alors qu'un mode situé entre 3 et 4  $\Phi$  (63-125  $\mu\text{m}$ ) est observé. Dans le profil BAL 4A, la transition avec les horizons de surface est graduelle et s'exprime par un décalage du mode 6-7  $\Phi$  vers des tailles légèrement plus fines (mode 7-8  $\Phi$ ; 4-8  $\mu\text{m}$ ), une diminution des argiles, une augmentation des sables grossiers et l'apparition discrète d'un mode situé entre 3 et 4  $\Phi$ . La composition géochimique totale du profil BAL 4A montre que la moraine peu altérée est principalement caractérisée par la présence du Ca, accompagné par le Sr. De faibles quantités de Si, Al, Fe, Mg, K et Ti sont également détectées. Une transition graduelle est observée en remontant vers la surface. Elle se concrétise par une diminution des teneurs en Ca et Sr, ainsi que par une nette augmentation en Si, Al, Fe, Ti et Mn.

Les deux profils se développant sur des moraines calcaires présentent une évolution similaire de leur composition minéralogique (fraction totale et < 2  $\mu\text{m}$ ) au sein des solums. La diminution progressive de la calcite en remontant vers les horizons de surface est attribuée à la forte présence de squelette calcaire de toutes tailles, fournissant une importante recharge en calcite. Inversement, l'augmentation graduelle en kaolinite et en chlorite peut être liée à des apports exogènes, alors que la présence d'intergrades pédogéniques (IV et IV-Al-Fe) témoigne de la transformation des silicates. Les signatures granulométriques du profil BAL 4A montrent une transition progressive, de même que l'évolution de la composition géochimique. En revanche, les courbes granulométriques du profil BAL 3A indiquent une discontinuité entre les échantillons de surface (< 30 cm de profondeur) et de profondeur (> 30 cm).

#### **Les sols sur moraine mixte (profils BAL 5A, BAL 5B, BAL 7 et CHX)**

Les quatre profils situés sur des moraines mixtes carbonatées présentent de grandes différences entre eux. Les valeurs de pH sont élevées (entre 8.0 et 8.5) dans les échantillons profonds correspondant aux moraines peu altérées et diminuent dans les horizons de surfaces (entre 5.7 et 7.5). La composition minéralogique totale présente de fortes variations entre les moraines : la calcite est dominante (30-60 %) dans les profils BAL 5A, BAL 5B et CHX, alors qu'elle n'est que faiblement présente (< 3 %) dans la moraine du profil BAL 7 où le quartz, les phyllosilicates et les plagioclases-Na sont majoritaires. De la dolomite est également présente dans la moraine du profil CHX (2-4 %) et augmente dans les horizons fluvio-glaciaires profonds (< 20 %). Les échantillons de surface des profils de sol sont décarbonatés (excepté pour le site CHX, où un chaulage a pu être réalisé) et dominés par le quartz et les phyllosilicates. Les feldspath-K et plagioclase-Na sont fortement représentés, alors que la fraction indosée est peu abondante

(< 12 %). La composition de la fraction granulométrique argileuse des moraines montre une nette dominance des micas et de la chlorite, ainsi que de la kaolinite en quantités moindres. Dans les échantillons de surface, les micas diminuent progressivement (profil BAL 5B, BAL 7 et CHX) ou abruptement (profil BAL 5A), alors que les intergrades illite-vermiculite augmentent. La proportion de kaolinite reste stable au sein des profils. La chlorite montre quant à elle de légères augmentations vers la surface. Les distributions granulométriques des moraines sont très hétérogènes et sont dominées par différents modes: les sables grossiers (1 Φ; 500 µm) et fins (4 Φ; 63 µm), les limons fins (6 Φ et 7-8 Φ; respectivement 16 et 4-8 µm) et les argiles (10 Φ; 1 µm). Les dépôts fluvio-glaciaires du profil CHX sont constitués de sables (mode 2 Φ; 250 µm) et de limons fins (mode 8 Φ; 4 µm) bien différenciés. Les échantillons de surface des profils présentent des courbes granulométriques plus platykurtiques que celles des moraines. Les mêmes modes granulométriques sont présents dans les horizons superficiels mais les proportions des différentes populations de grains varient. La composition géochimique du profil BAL 5A indique une diminution des proportions de Ca et de Sr dans les horizons morainiques profonds en direction de la surface, alors que les éléments Si, Al, Fe, Mn et Ti augmentent progressivement. Une rupture est visible avec les échantillons superficiels (< 30 cm de profondeur) présentant une composition homogène. Le Ca est présent en faibles quantités, alors que Si, Al, Fe, Mn et Ti sont abondants, par rapport à la moraine sous-jacente. De faibles concentrations de Na sont également détectées.

Le groupe des profils de sol se développant sur des moraines mixtes carbonatées est hétéroclite. En effet, l'hétérogénéité des moraines elles-mêmes, du point de vue de la composition minéralogique ou granulométrique, impacte sur le développement du sol. De plus, des discontinuités lithologiques sont présentes entre les couches de surface et les dépôts morainiques de profondeur. D'une manière générale, la calcite est présente au fond des profils et induit des valeurs de pH élevées. En revanche, les horizons de surface sont décarbonatés ou peu carbonatés et les minéraux exogènes (plagioclase-Na, feldspath-K en grande quantité, chlorite) sont abondants. Les courbes granulométriques montrent quant à elles des mélanges de populations de grains, aussi bien dans les moraines que dans les échantillons de surface.

### **Le sol sur moraine cristalline (profil BAL 6A)**

Ce profil de sol est homogène dans sa composition minéralogique, granulométrique et géochimique et les rares changements observables au sein du profil se font de façon progressive. Les valeurs de pH sont acides et se distribuent entre 5.3 (en profondeur) et 3.9 (en surface). La terre fine est entièrement décarbonatée dans tout le profil et la composition minéralogique de la fraction totale est dominée par le quartz (30-55 %), accompagné par d'importantes quantités de phyllosilicates, de plagioclase sodique et de feldspath potassique. La fraction argileuse est principalement constituée d'intergrades illite-vermiculite (IV et IV-Al-Fe) et de chlorite, cette dernière présentant une augmentation graduelle en direction de la surface. Des quantités moindres de mica et de kaolinite sont également présentes, alors que la smectite est détectée en très faibles proportions dans les échantillons superficiels. Les distributions granulométriques montrent une dominance des sables fins (mode 3-4 Φ; 63-125 µm) tout au long du profil, avec néanmoins une diminution de ce mode dans les deux échantillons de surface. Des populations de limons fins (6-7 Φ; 8-16 µm) et d'argiles (10 Φ; 1 µm) sont identifiées. Les sables grossiers (1 Φ; 500 µm) sont également présents en quantités variables dans les échantillons. La composition géochimique du profil est dominée par les éléments Si, Al et Fe. Les proportions de Si restent très stables dans tout le profil, alors que Al et Fe montrent une augmentation dans les horizons profonds (> 60 cm). De moindres proportions de K, Mg, Na, Mn et Ti sont égale-

ment présentes. Ca et Sr ne sont mesurés qu'en faibles concentrations, en comparaison avec les profils carbonatés décrits plus haut.

### **Le carbone organique total (RockEval)**

Les valeurs de TOC se distribuent entre 0.03 et 25.31 % (résultats en annexe), et montrent une diminution systématique de la surface vers la profondeur des profils. Le solum BAL 7 constitue la seule exception en affichant dans l'échantillon situé entre 50 et 70 cm de profondeur une valeur de TOC (1.37 %) légèrement supérieure aux échantillons sus- et sous-jacents. Les profils situés sur dalle et sur moraine calcaires contiennent les plus hauts taux de TOC dans leurs horizons superficiels (entre 10 et 25 %). Les profils développés sur loess et sur moraines mixtes possèdent des teneurs en TOC situées entre 4 et 11 %, alors que le profil localisé sur moraine cristalline présente les plus faibles proportions en TOC, avec des valeurs ne dépassant pas 2.2 % dans les horizons superficiels.

### **Les cations extraits à l'eau (chromatographie ionique)**

Les cinq cations mesurés (calcium, potassium, sodium, magnésium et ammonium) montrent des distributions similaires au sein des profils, avec des valeurs maximales dans les horizons de surface suivies d'une diminution dans les horizons de profondeur (résultats en annexe). Le calcium extrait à l'eau affiche les valeurs les plus hautes des cations dosés (entre 0.005 et 0.323 mg/g de sol) et présente des concentrations plus importantes dans les sols BAL 1 à BAL 5B que dans ceux situés plus bas sur la toposéquence (sols BAL 6A à CHX). Le potassium montre une nette augmentation dans l'échantillon le plus superficiel de chaque profil, avec une valeur maximale de 0.047 mg/g de sol dans l'échantillon CHX 0-5. Le sodium, le magnésium et l'ammonium présentent un comportement similaire à celui du potassium, mais atteignent des valeurs maximales < 0.02 mg/g de sol.

### **4.2.3. Caractérisation des roches autochtones**

Cette section décrit les roches calcaires et les marnes provenant du massif jurassien (substrats lithologiques en place dans les profils ou fragments de roche issus des moraines jurassiennes). Ces roches, qui correspondent à des bancs lithologiques déterminés, sont décrites au travers de leur composition minéralogique de la fraction totale et du résidu insoluble < 2 µm, ainsi que par leur faciès observé en lames minces.

#### **Composition minéralogique**

Les roches étudiées sont majoritairement composées de calcite, dont la proportion varie en fonction de la pureté des calcaires. La quantité et la composition du résidu d'altération (RI), principalement composé de quartz, de phyllosilicates et de la fraction indosée (tableau 4.1), varie fortement d'un banc à l'autre et montre également des modifications importantes au sein d'un même banc, notamment en fonction du faciès des roches. Les feldspaths potassiques et les plagioclases sodiques sont très faiblement représentés (< 2 %) dans toutes les roches analysées. Les interstratifiés illite-vermiculite (IV et IV-Al-Fe) sont totalement absents des roches, ce qui atteste de leur origine pédogénique et non héritée dans les sols (tableau 4.2). Les calcaires jurassiques du Kimmeridgien, du Portlandien et du Purbeckien contiennent entre 1 et 18 % de résidu insoluble, en fonction des échantillons. Les phyllosilicates sont faiblement représentés et principalement composés de micas, de kaolinite (Kimmeridgien et Portlandien) et de smectite (Purbeckien). La chlorite présente des pourcentages relatifs élevés dans la fraction < 2 µm de certains échantillons (par exemple 23 % dans la roche BAL1.3-R), mais les quantités sont

en réalité très faibles au regard de la proportion de phyllosilicates mesurée dans la fraction totale (indétectables dans l'échantillon BAL1.3-R). Les calcaires du Berriasien sont caractérisés par l'abondance de la kaolinite dans la fraction < 2 µm (ADATTE, 1988; PERSOZ, 1982). Cependant, d'importantes variations sont observées entre les faciès. Le calcaire de Thoiry est un calcaire très pur dont les proportions en quartz et en phyllosilicates sont pratiquement nulles. En revanche, les couches de la Corraterie présentent une alternance de calcaires et de marnes, dans lesquelles le RI peut atteindre 53 %. Les phyllosilicates sont minoritaires par rapport à la fraction quartzeuse (représentant < 29 % de la fraction totale dans certaines marnes), qui constitue une source importante de matériel résiduel autochtone pouvant potentiellement se retrouver dans les sols. Les bancs du Valanginien présentent quant à eux une fraction < 2 µm riche en smectite et dépourvue de kaolinite (ADATTE & RUMLEY, 1984; PERSOZ, 1982). Les niveaux marneux (marnes d'Arzier et marnes intercalaires) contiennent jusqu'à 47 % de RI, comprenant de grandes quantités de quartz et de phyllosilicates. Le Calcaire Roux est composé d'une fraction résiduelle dominée par le quartz et la fraction indosée où les phyllosilicates ne sont que faiblement représentés. Finalement, le calcaire de l'Hauterivien contient 6 % de résidu insoluble, composé principalement de quartz. Les phyllosilicates, non détectés dans la fraction totale, sont essentiellement constitués de smectite.

### Faciès

L'observation du faciès des roches en lame mince permet d'une part de confirmer la détermination des substrats lithologiques (notamment en ce qui concerne les échantillons provenant de moraines carbonatées) et d'autre part de caractériser certains éléments composant les roches et pouvant potentiellement être libérés lors de l'altération, à l'image des fragments de coquilles ou d'échinodermes, de grains de quartz, ou d'oxy-hydroxydes de fer. Les descriptions présentées ci-dessous correspondent aux échantillons collectés sur les zones d'étude et ne prennent pas en compte la totalité des faciès observables dans les bancs en question – pour cela, se référer par exemple à ADATTE (1988), AUBERT (1941) ou FALCONNIER (1951).

- Kimméridgien : Calcaire micritique comprenant des fragments de coquilles et des cristaux de dolomite, en partie remplacés par de la calcite. Imprégnations d'oxydes de fer par endroits. (Échantillons BAL2-R, BAL3B-R, BAL3C-R).
- Portlandien : Calcaire blanc d'aspect poreux, saccharoïde. Présence de cristaux de dolomite, parfois remplacés par de la calcite (dédolomitisation ; figure 4.6 A et B). Peu de fossiles observés. (Échantillons AMB1.3-R, BAL1-R, BAL6B-R).
- Purbeckien : Calcaire gris micritique compact contenant des fossiles d'eau douce (oo-gones de characées, fossiles d'ostracodes). (Échantillon AMB1.6-R).
- Berriasien, Calcaire de Thoiry : Calcaire micritique grisâtre à bioclastes, présentant un faciès de milieu peu profond de plateforme carbonatée. Les caractéristiques suivantes ont été observées selon les échantillons : traces de bioturbation, pelloïdes, quelques oolithes, morceaux de coquilles de bivalves et d'échinodermes, foraminifères benthiques de grande taille, quelques veines de calcite. Pas de grains de quartz ni d'oxydes de fer. (Échantillons AMB1.1-R, AMB1.2-R, AMB1.7-R, AMB2-R).
- Berriasien, Couches de la Corraterie : Calcaire micritique très dense, faciès de milieu plus profond. Les caractéristiques suivantes ont été observées selon les échantillons : oolithes, pelloïdes (figure 4.6 D), grains de quartz (parfois très abondants), foraminifères (notamment des Trocholines), débris d'échinodermes (crinoïdes), de bivalves et de gastéropodes, oxydes de fer, matière organique. (Échantillons AMB3.1-R, AMB3.2-R, AMB3.3-R, AMB4-R, AMB5B-R).

Tableau 4.1. Composition minéralogique totale des roches calcaires prélevées sur les sites d'étude.

Fraction totale (%)

Banc	Echantillons	RI (%)	Calcite + Dolomite	Quartz	Phyllosilicates	Feldspath-K	Plagioclase-Na	Indosés
<b>Kimmeridgien</b>	BAL2-R, BAL3B-R, BAL3C-R	1.1 - 17.6	82.4 - 98.9	0.3 - 5.9	0.0 - 7.1	0.0 - 1.8	0.0 - 0.5	0.9 - 4.1
<b>Portlandien</b>	AMB1.3-R, BAL1-R, BAL6B-R	4.7 - 13.6	86.5 - 95.3	0.4 - 2.7	0.0 - 5.1	0.0 - 1.0	0.0	3.6 - 12.8
<b>Purbeckien</b>	AMB1.6-R	5.9	94.1	2.1	0.0	0.0	0.0	3.8
<b>Berriasiens</b>	Calcaire de Thoiry	0.9 - 9.1	90.9 - 99.1	0.1 - 0.8	0.0	0.0 - 0.3	0.0	0.8 - 8.2
Couches de la Corraterie	AMB1.1-R, AMB1.2-R, AMB1.7-R, AMB2-R	1.8 - 18.4	81.6 - 98.2	1.2 - 8.1	0.0 - 4.2	0.0 - 0.8	0.0	0.3 - 5.3
Marnes	AMB3.1-R, AMB3.2-R, AMB3.3-R, AMB4-R, AMB5B-R	40.6 - 52.8	47.2 - 59.4	8.1 - 28.4	6.4 - 13.6	0.0 - 0.9	0.0	10.8 - 25.2
<b>Valanginien</b>	Marnes d'Arzier	AMB6 marnes	46.8	53.2	14.5	21.2	0.6	0.0
Calcaire Roux	AMB1.5-R, AMB7-R, AMB8A-R, AMB9-R	3.0 - 13.8	86.3 - 97.0	0.9 - 5.7	0.0 - 3.7	0.0 - 0.8	0.0 - 0.3	10.5
Marnes intercalaires	AMB8B 100-120	35.8	64.2	12.7	10.2	0.0	0.0	1.2 - 5.6
<b>Hauterivien</b>	AMB1.4-R	6.0	94.0	4.1	0.0	0.0	0.0	12.9
								1.9

Tableau 4.2. Composition minéralogique de la fraction < 2 µm des roches calcaires prélevées sur les sites d'étude.

Fraction <2 um (%)

Banc	Echantillons	RI (%)	Smectite	IV + IV-Al-Fe	IS1 + IS2	Mica	Kaolinite	Chlorite
<b>Kimmeridgien</b>	BAL2-R, BAL3B-R, BAL3C-R	1.1 - 17.6	1.7 - 8.8	0.0	3.1 - 15.2	36.6 - 44.7	32.7 - 51.2	6.3 - 7.0
<b>Portlandien</b>	AMB1.3-R, BAL1-R, BAL6B-R	4.7 - 13.6	0 - 6.1	0.0	6.6 - 13.1	51.6 - 69.4	7.7 - 25.4	5.2 - 22.7
<b>Purbeckien</b>	AMB1.6-R	5.9	41.6	0.0	12.4	46.0	0.0	0.0
<b>Berriasiens</b>	Calcaire de Thoiry	0.9 - 9.1	1.4 - 20.1	0.0	3.9 - 6.8	23.8 - 52.8	26.7 - 67.3	3.5 - 12.2
Couches de la Corraterie	AMB3.1-R, AMB3.2-R, AMB3.3-R, AMB4-R, AMB5B-R	1.8 - 18.4	8.2 - 33.0	0.0	7.1 - 11.3	20.5 - 29.8	32.4 - 45.1	6.1 - 9.9
Marnes	AMB4 60-80, AMB5A 85-105	40.6 - 52.8	26.9 - 31.4	0.0	5.8 - 13.1	17.7 - 23.1	33.3 - 36.6	5.8 - 6.3
<b>Valanginien</b>	Marnes d'Arzier	AMB6 marnes	46.8	66.0	0.0	12.2	20.2	0.0
Calcaire Roux	AMB1.5-R, AMB7-R, AMB8A-R, AMB9-R	3.0 - 13.8	34.0 - 69.6	0.0	7.9 - 19.2	18.4 - 46.8	0 - 6.8	0 - 5.0
Marnes intercalaires	AMB8B 100-120	35.8	71.8	0.0	13.5	14.8	0.0	0.0
<b>Hauterivien</b>	AMB1.4-R	6.0	59.5	0.0	11.8	28.7	0.0	0.0

- Valanginien, Marnes d'Arzier: Marnes grises dolomitiques riches en fer et en argiles gonflantes (figure 4.6 C). Des grains de quartz et quelques fragments de fossiles (spicules d'éponges) ont été observés. (Échantillon AMB6\_LM1).
- Valanginien, Calcaire Roux: Calcaire jaunâtre oolithique à ciment sparitique (figure 4.6 E et F). Les caractéristiques suivantes ont été observées selon les échantillons : oolithes (nombreuses), oxydes de fer, fragments de bryozoaires, de gastéropodes et d'échinodermes, quelques foraminifères, quelques grains de quartz. (Échantillons AMB1.5-R, AMB7-R, AMB8A-R, AMB9-R).
- Hauterivien, Pierre Jaune de Neuchâtel: Calcaire détritique grossier gris-verdâtre, très hétérogène. Beaucoup de fossiles, fragments d'échinodermes et de bryozoaires, foraminifères, grains de quartz. Présence de glauconite. (Échantillon AMB1.4-R).

#### **4.2.4. Caractérisation des roches allochtones**

Les fragments de roche prélevés dans les moraines (calcaires, mixtes et cristallines) du site de Ballens sont caractérisés en fonction de leurs compositions minéralogique et géochimique totales et de leur faciès observé en lames minces. Les échantillons analysés se partagent entre des roches de type sédimentaire et métamorphique. Les résultats montrent que certaines roches calcaires proviennent vraisemblablement du massif jurassien (notamment les échantillons de la moraine BAL 4A) et pourraient en conséquence être incluses dans le § 4.2.3. traitant des roches autochtones. Cependant, ce paragraphe met principalement l'accent sur les roches cristallines d'origine alpine, afin d'appréhender leur contribution potentielle aux sols, en termes de minéralogie et de géochimie.

Des roches constituées de plus de 75 % de calcite (BAL4A.1-R, 4A.2-R, 5A-R, 5B.1-R, 7.1-R et 7.2-R) ont été prélevées dans les moraines mixtes et calcaires (tableau 4.3). Leur résidu insoluble est majoritairement composé de quartz, accompagné parfois de phyllosilicates. La composition géochimique de ces roches calcaires est dominée par Ca et Sr et comprend des proportions variables en Si, Al, Mg (lié à la présence de dolomite) et Fe (tableau 4.4). Les roches sédimentaires BAL5B.4-R et BAL5B.5-R contiennent de la calcite et du quartz en proportions équivalentes, ainsi que des phyllosilicates et du plagioclase. Leur composition géochimique montre une augmentation en Si, Al, Mn et Fe par rapport aux roches calcaires précédentes. L'échantillon BAL6A.2-R est un grès de couleur brun-rouge constitué de > 50 % quartz, accompagné par des quantités importantes de phyllosilicates (chlorite, mica). Si, Al et Mg dominent la composition géochimique de cet échantillon, alors que K, Mn, Fe, Na et Ti se trouvent en proportions importantes. Les roches BAL5B.2-R et BAL7.4-R, également sédimentaires, ne comprennent pas de carbonate et sont constituées d'une majorité de minéraux du groupe des feldspaths, de quartz et de phyllosilicates (principalement des micas). Les éléments Si, Al et Fe sont abondants et les éléments alcalins et alcalino-terreux (Na, Mg, K, Ca) sont bien représentés.

Parmi les roches métamorphiques prélevées, l'échantillon BAL5B.3-R est décrit comme une météo-arkose (roche métasédimentaire; NEUENDORF *et al.*, 2005) principalement composé de quartz, de plagioclase et de micas blancs (par exemple muscovite), ainsi que de chlorites riche en fer (figure 4.7 A et B). La composition géochimique présente des valeurs importantes en Si, Al, Fe, Ti, K, Na et P. Les roches BAL6A.1-R et BAL7.3-R sont des quartzites constituées de 35-40 % de quartz, de 15-30 % de phyllosilicates (micas, chlorite) et de 25-35 % de minéraux du groupe des feldspaths (figure 4.7 C et D). D'autres minéraux tels que des grenats et des oxydes ont été observés dans ces échantillons. Na et K sont abondants dans les deux roches, alors que Mg et Fe présentent des valeurs particulièrement élevées dans l'échantillon BAL7.3-R. La roche

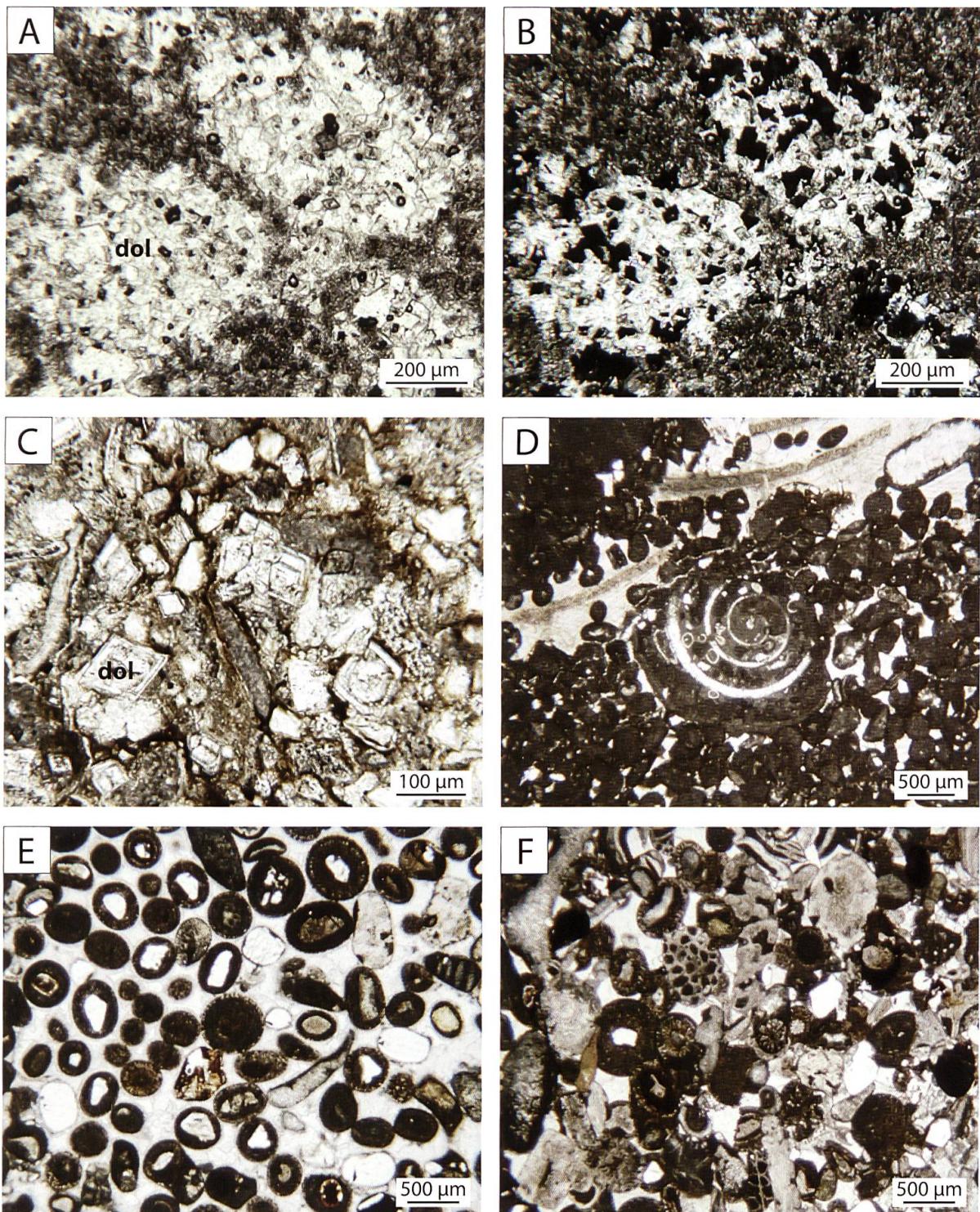


Figure 4.6. Microfaciès des roches calcaires et des marnes observées en lame mince. dol = dolomite A) Dissolution des cristaux de dolomite dans un calcaire du Portlandien (échantillon AMB1.3-R) formant une porosité moldique. B) Même image en lumière polarisée analysée (XPL). C) Cristaux de dolomite et d'oxy-hydroxydes de fer dans les marnes d'Arzier (Valanginien; échantillon AMB6 LM1; 165 cm de profondeur). D) Calcaire à pelloïdes des couches de la Corraterie riche en fragments de fossiles (Gastéropode au centre; Berriasien; échantillon AMB5B-R). E) Calcaire oolithique du Calcaire Roux (Valanginien; échantillon AMB8A-R). F) Calcaire à bioclastes et oolithes du Calcaire Roux (Valanginien; échantillon AMB9-R).

Tableau 4.3. Composition minéralogique totale des roches issues des moraines calcaires, mixtes et cristallines du site de Ballens.

Échantillon	Type de roche	RI (%)	Fraction totale (%)					
			Calcite + Dolomite	Quartz	Phyllo.	Feldspath-K	Plagio-Na	Indosés
BAL4A.1-R	sédimentaire (calcaire)	1.9	98.1	0.3	0.0	0.0	0.0	1.6
BAL4A.2-R	sédimentaire (calcaire)	22.7	77.3	3.0	14.9	0.0	0.0	4.8
BAL5A-R	sédimentaire (calcaire)	4.7	95.3	0.2	0.0	0.0	0.0	4.4
BAL5B.1-R	sédimentaire (calcaire)	2.4	97.6	0.7	0.0	0.0	0.0	1.7
BAL5B.2-R	sédimentaire métasédimentaire (méta-arkose)	100	0.0	32.4	12.8	1.4	48.5	4.9
BAL5B.3-R	métasédimentaire (méta-arkose)	99.4	0.6	38.7	18.5	0.0	38.5	3.8
BAL5B.4-R	sédimentaire (grès et calcaire)	66.0	34.0	35.3	19.9	0.0	9.9	0.9
BAL5B.5-R	sédimentaire (calcaire)	60.0	40.0	32.5	11.6	0.0	15.3	0.5
BAL6A.1-R	métamorphique (quartzite)	99.3	0.7	42.9	17.0	15.5	21.8	2.1
BAL6A.2-R	sédimentaire (grès brun-rouge)	100	0.0	55.3	27.9	3.8	7.7	5.2
BAL6A.3-R	métasédimentaire (méta-arkose)	96.7	3.3	33.2	10.0	29.5	23.1	0.9
BAL6A.4-R	métamorphique (méta-arkose et zones à faciès de schiste bleu)	100	0.0	49.6	9.1	1.4	37.9	2.0
BAL7.1-R	sédimentaire (calcaire)	3.8	96.2	2.0	0.0	0.0	0.0	1.7
BAL7.2-R	sédimentaire (calcaire)	1.2	98.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.8
BAL7.3-R	métamorphique (quartzite)	100	0.0	36.2	32.9	3.9	22.5	4.5
BAL7.4-R	sédimentaire	100	0.0	28.4	13.6	27.5	27.9	2.6
CHX-R	métamorphique (serpentinite)							

Tableau 4.4. Composition géochimique totale des roches issues des moraines calcaires, mixtes et cristallines du site de Ballens.

Échantillon	Type de roche	Composition géochimique totale (ppm)						
		Na	Mg	Al	Si	P	Mn	Fe
BAL4A.1-R	sédimentaire (calcaire)	0	11902	0	1887	33	55	709
BAL4A.2-R	sédimentaire (calcaire)	0	32949	5793	23832	125	97	4187
BAL5A-R	sédimentaire (calcaire)	0	9650	0	641	31	87	423
BAL5B.1-R	sédimentaire (calcaire)	0	34456	2400	12718	116	73	2068
BAL5B.2-R	sédimentaire	27927	14786	74145	327959	959	211	28179
BAL5B.3-R	métamorphique (mica schiste)	22703	14727	88344	301612	944	862	51241
BAL5B.4-R	sédimentaire (grès et calcaire)	0	12429	4382	329430	60	5025	4885
BAL5B.5-R	sédimentaire (calcaire)	8694	5022	12996	188084	425	553	7615
BAL6A.1-R	métamorphique (quartzite)	28749	3442	56733	357254	496	327	12813
BAL6A.2-R	sédimentaire (grès brun-rouge)	6677	22548	66272	350766	330	1283	33831
BAL6A.3-R	métamorphique (type granite)	27394	0	55442	367868	135	41	2962
BAL6A.4-R	métamorphique (faciès de schiste bleu)	31634	27722	123683	233310	1516	1152	80018
BAL7.1-R	sédimentaire (calcaire)	0	34811	3747	20462	110	54	2867
BAL7.2-R	sédimentaire (calcaire)	0	10230	1077	5491	97	100	1373
BAL7.3-R	métamorphique (quartzite)	20973	22648	104298	272114	810	575	54269
BAL7.4-R	sédimentaire	27042	3813	64910	343277	303	491	16973

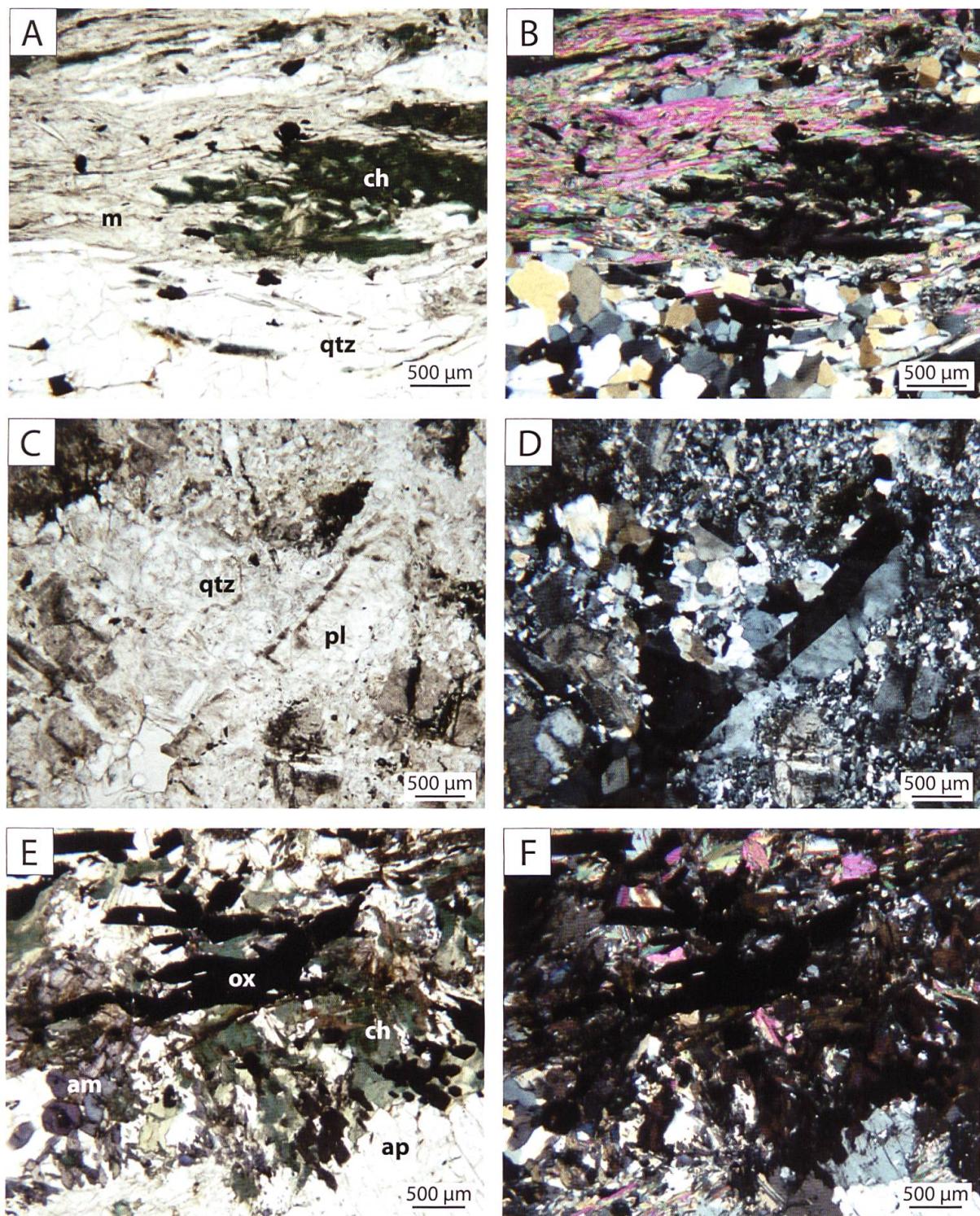


Figure 4.7. Images en lame mince de roches cristallines provenant des moraines du site de Ballens. Les minéraux identifiés sont les suivants. qtz = quartz, ch = chlorite, m = mica, pl = plagioclase, ox = oxydes de titane, am = amphibole sodique, ap = apatite. A) Chlorites riches en fer, micas blancs et quartz dans un micaschiste (échantillon BAL5B.3-R). B) Même image en XPL. C) Grains de quartz et plagioclase dans une quartzite (échantillon BAL6A.1-R). D) Même image en XPL montrant la macle simple du plagioclase. E) Oxydes de titane en forme de baguettes, amphiboles sodiques, chlorites riches en fer et apatites dans une roche métamorphique présentant un faciès de schiste bleu (échantillon BAL6A.4-R). F) Même image en XPL.

BAL6A.3-R est une mété-arkose composé d'un mélange de quartz, feldspath potassique, plagioclase sodique et micas blancs, dont la composition est dominée par Si, Al, K et Na. Le fragment BAL6A.4-R présente quant à lui une texture hétérogène. Certaines zones riches en apatites, en chlorites ferrifères et en amphiboles bleues sodiques (de type Fe-glaucophane – crossite) sont caractéristiques du faciès de schiste bleu. Des oxydes de titane millimétriques sont associés aux amphiboles (figure 4.7 E et F). Le reste de la roche, une mété-arkose, est constituée de près de 50 % de quartz et 40 % de plagioclase. La composition géochimique de cet échantillon montre des valeurs très élevées en Al, Fe, K, Mg, Na, Ti et P. Finalement, la roche CHX-R est une serpentinite provenant du manteau, retrouvée dans la moraine mixte du plateau de Ballens. La composition géochimique de cette roche n'a pas été déterminée, mais les observations en lame mince montrent la présence de serpentine (90 %), de cœurs préservés de pyroxènes (fortement remplacés par de la serpentine), de magnétite et de chlorite riche en Mg. La texture souvent grenue de cette serpentinite indique qu'il s'agit très probablement d'antigorite. Cette roche a vraisemblablement été formée au Mésozoïque lors de l'ouverture de l'océan Piémont-Ligure (partie de l'océan Thétys) par l'hydratation de péridotites par l'eau de mer, avant de se retrouver prise dans le plissement des nappes alpines. Actuellement, les affleurements de ce type de roche se retrouvent principalement dans la région de Zermatt-Saas Fee (SWISSTOPO, 2005). Le fragment retrouvé dans le profil CHX a donc manifestement été transporté par le glacier du Rhône.

## 4.3. Observations microscopiques

### 4.3.1. Micromorphologie ciblée

L'observation des lames minces de sol a été réalisée de façon préférentielle dans le but de caractériser certains traits pédologiques précis tels que les revêtements argileux dans la porosité, la morphologie des carbonates secondaires, les nodules, revêtements et imprégnations d'oxy-hydroxydes de fer, la structuration de la matrice du sol (assemblage de biréfringence) et le squelette du sol (STOOPS, 2003; STOOPS *et al.*, 2010). La majorité des lames constituées d'une fraction argileuse dominante (assemblage c/f de type porphyrique) a subi une fissuration importante lors du processus de fabrication. Les réseaux de fentes observés sont en conséquence un artéfact. Les photos de lames minces de sol prises au microscope optique sont systématiquement orientées dans le même sens que l'échantillon prélevé dans le sol (haut de l'image = haut de l'échantillon).

#### Les revêtements argileux

Les revêtements d'argiles minéralogiques dans la porosité des horizons profonds du sol témoignent de l'accumulation des particules orientées lors du processus de lessivage de la fraction fine. Ce phénomène est identifiable en lames minces par l'extinction en bandes caractéristique des revêtements argileux visible en XPL (figure 4.8 A, B, C et D). Les revêtements ferri-argileux se forment lorsque des oxy-hydroxydes de fer restent adsorbés aux argiles lessivées (figure 4.8 E et F). Des revêtements argileux ou ferri-argileux ont été observés dans les horizons profonds des profils AMB 4, 5A, 6, 7, 8B, BAL 2, 3C, 6A, 6B et 7, bien que le processus de lessivage des argiles n'ait pas toujours été détecté lors de la description des profils ou au regard des analyses granulométriques (voir § 4.1.3.).

#### Les carbonates secondaires

Deux morphologies distinctes de carbonate secondaire ont été observées dans les sols étudiés. L'accumulation de cristaux rhomboédriques dans la porosité de l'horizon IIcakg du profil

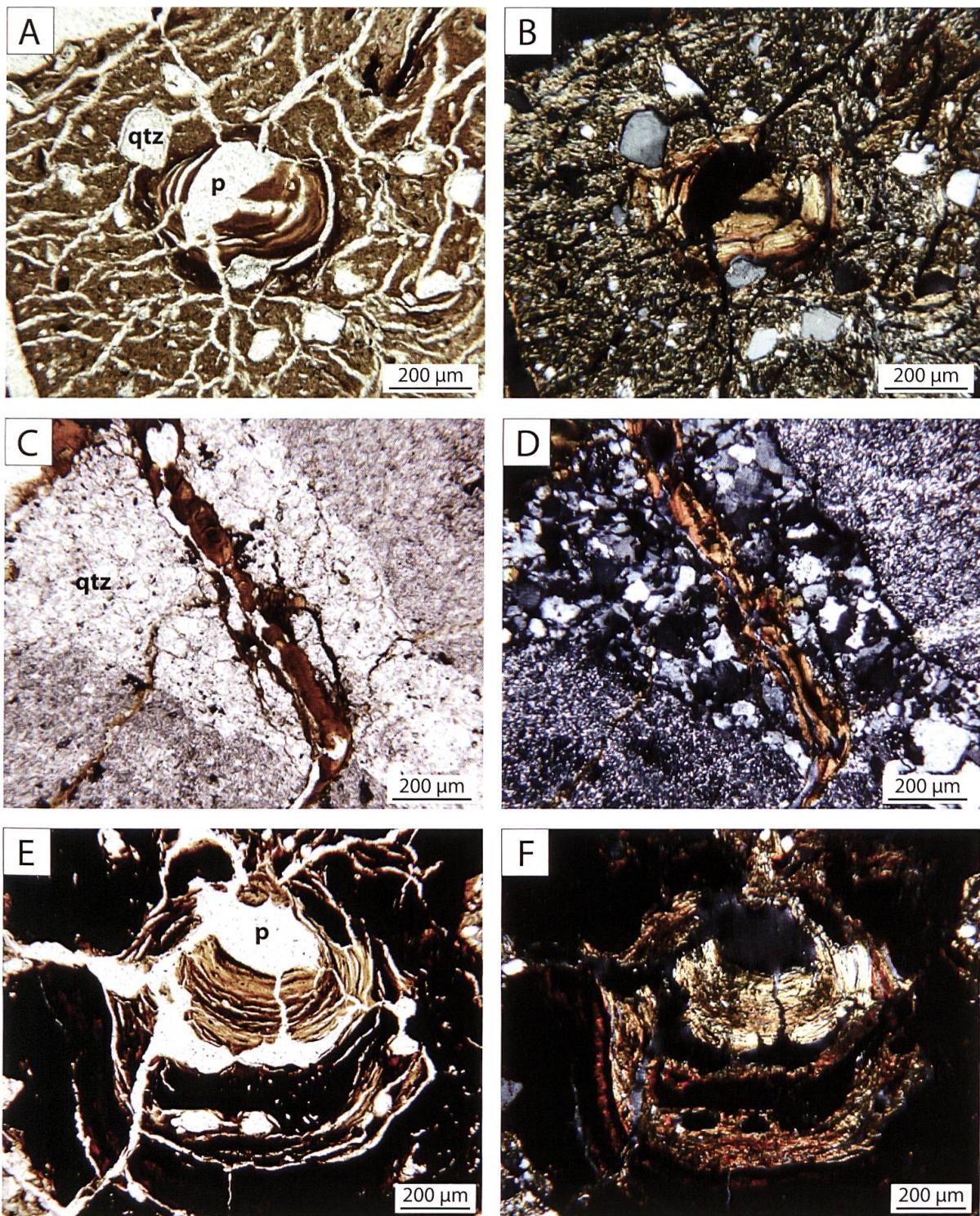


Figure 4.8. Revêtements argileux et ferri-argileux observés en lame mince dans les sols. Le réseau de fentes dans la matrice du sol visible dans cette figure ainsi que dans toutes les figures de micromorphologie suivantes est un artefact de fabrication. p = pore; qtz = quartz. A) Revêtement d'argiles en coupe dans un pore (échantillon AMB7 LM1; 36 cm de profondeur). B) Même image en XPL. Le revêtement d'argiles orientées montre une extinction en bandes ainsi qu'une structure micro-lamellaire. L'assemblage de biréfringence présente une structure granostrisée provoquée par l'orientation des argiles autour des grains du squelette. Les grains de quartz forment deux populations de tailles distinctes. C) Fissure dans un grain minéral remplie de revêtements ferri-argileux de couleur brun-rouge (échantillon BAL6A LM2; 66 cm de profondeur). D) Même image en XPL. L'extinction en bandes des revêtements argileux est bien visible. E) Revêtements argileux, ferri-argileux et ferriques à l'intérieur d'un nodule d'oxy-hydroxydes de fer concentré (échantillon AMB5A LM4; 29 cm de profondeur). F) Même image en XPL. Une lamination est visible à l'intérieur du nodule d'oxy-hydroxydes de fer et des différents types de revêtements.

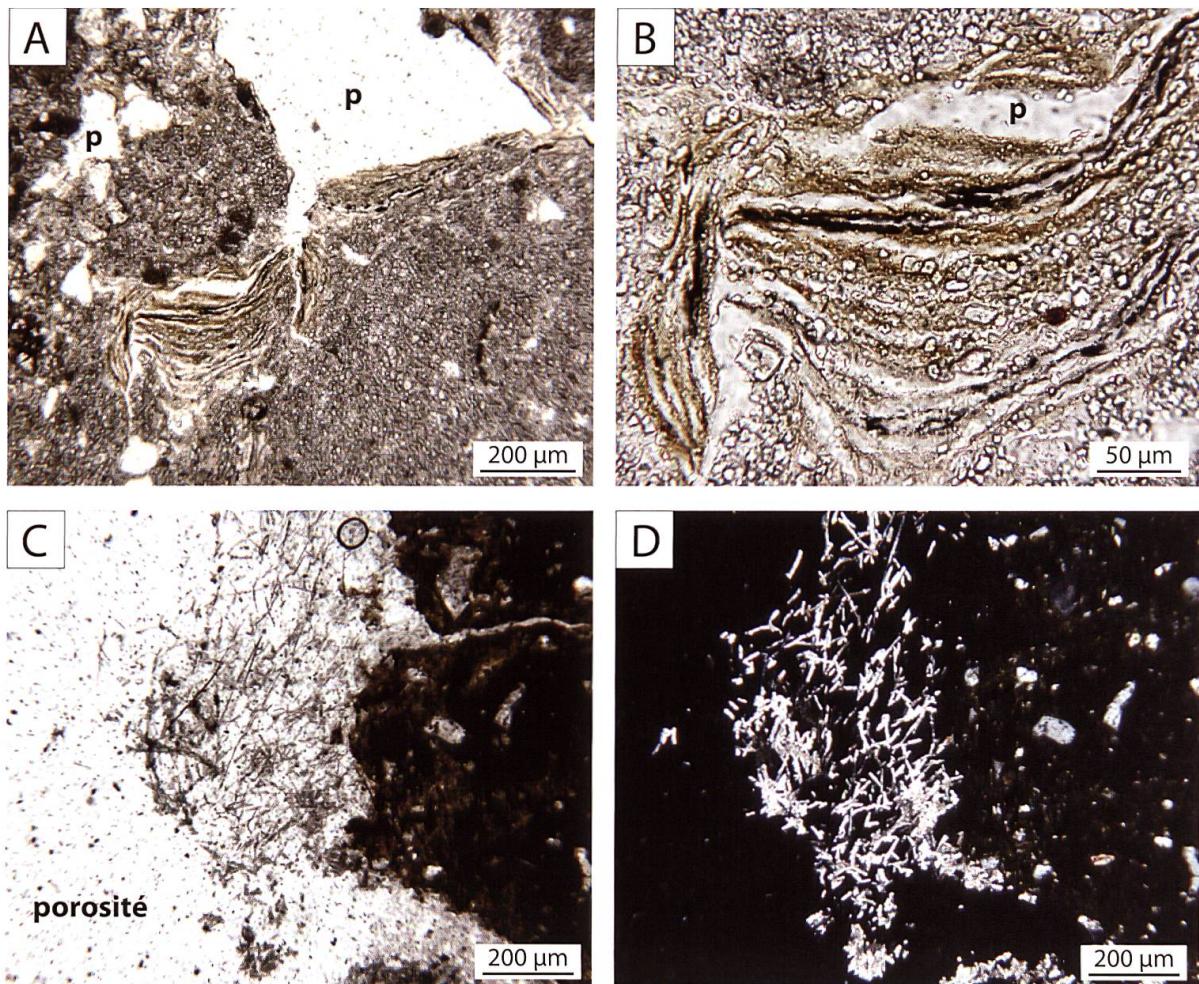


Figure 4.9. Morphologies différentes des carbonates secondaires observés en lame mince de sol. p = pore. A) Nodule constitué de cristaux rhomboédriques de calcite microsparitique dans la porosité de l'horizon IIcakg du profil AMB 6, sous l'influence d'une nappe perchée battante (échantillon AMB6 LM3; 63 cm de profondeur). Les grains du squelette issus des marnes sont repoussés à l'extérieur du nodule. B) Détail de A montrant la superposition de revêtements d'argiles, de fer et de calcite dans un pore. Les cristaux de calcite de forme rhomboédrique semblent se former entre les différentes générations de revêtements argileux et ferriques. C) Réseau de filaments fongiques associés à de la calcite en aiguilles observé dans la porosité de l'échantillon BAL4B LM1 (7 cm de profondeur). D) Même image en XPL montrant la polarisation de la calcite en aiguilles.

AMB 6 forme des nodules blancs pulvérulents (figure 4.9 A). Les revêtements de cristaux de calcite dans les pores se trouvent parfois en alternance avec des revêtements argileux (figure 4.9 B). Des cristaux de calcite en forme d'aiguilles sont observés dans la porosité de l'horizon Scaho du profil BAL 4B (figure 4.9 C et D). Ces cristaux sont généralement associés à des réseaux de filaments fongiques visibles en PPL.

#### Les oxy-hydroxydes de fer

Les imprégnations d'oxy-hydroxydes de fer de la matrice du sol autour des fissures ou des pores présentent des contours diffus et parfois des zonations concentriques (figure 4.10 A et B). Dans certains horizons rédoxiques, l'accumulation d'oxy-hydroxydes de fer autour des racines vivantes forme des hypo-revêtements denses incluant les grains du squelette, alors qu'une zone de déplétion se forme dans la matrice du sol alentour (figure 4.10 C). Des nodules foncés de différentes tailles constitués d'oxy-hydroxydes de fer sont observés dans les sols, principalement au site des Amburnex. Des petits grains mesurant environ 100 µm de diamètre sont présents

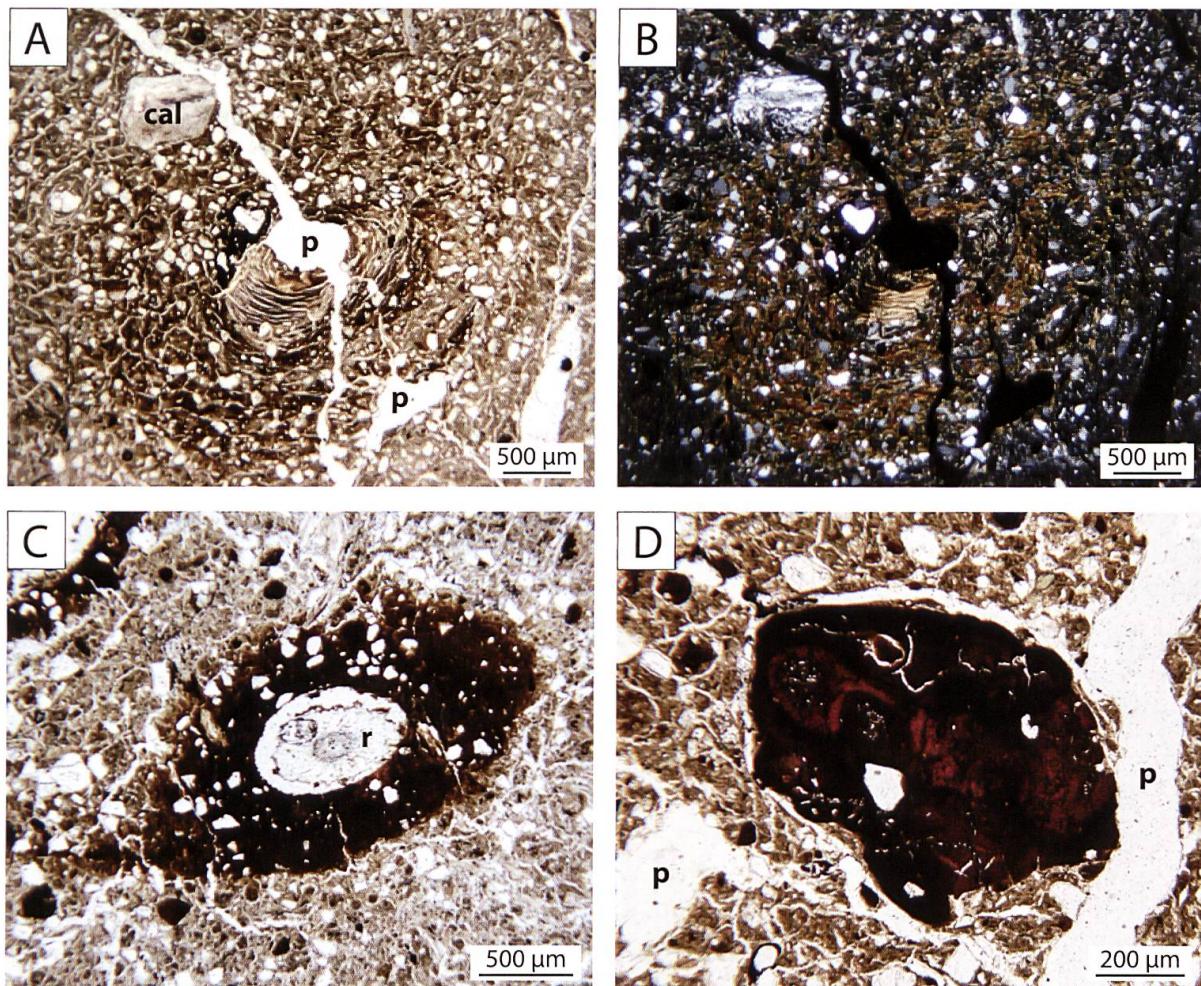


Figure 4.10. Nodule, hypo- et quasi-revêtements d'oxy-hydroxydes de fer observés en lame mince. p = pore; r = racine; cal = calcédoine. A) Quasi-revêtements concentriques d'oxy-hydroxydes de fer autour d'un pore dans l'échantillon AMB5A LM6 (3 cm de profondeur). Un revêtement argileux borde la face inférieure du pore et représente la dernière phase de pédogenèse. B) Même image en XPL. Le revêtement argileux montre une extinction en bande caractéristique. Le squelette du sol est composé de grains de quartz homométriques. Un grain plus grossier de calcédoine est également visible. C) Hypocoat d'oxy-hydroxydes de fer autour d'une racine vivante (échantillon AMB4 LM5; 3 cm de profondeur). Une zone de déplétion est visible autour du revêtement. De petits grains foncés d'oxy-hydroxydes de fer mesurant environ 100 µm de diamètre sont présents dans la matrice du sol. D) Gros nodule d'oxy-hydroxydes de fer montrant plusieurs générations d'induration autour de racines. Certaines cellules végétales « fossilisées » par la précipitation des oxy-hydroxydes de fer sont toujours visibles à l'intérieur du nodule (échantillon AMB7 LM3; 13 cm de profondeur).

dans la matrice des horizons développés dans les dépôts de surface (figure 4.10 C et D). De plus gros nodules foncés parfois fissurés et pouvant mesurer jusqu'à 1 mm de diamètre sont également observés. Ces nodules sont bien délimités et incluent peu d'éléments du squelette. Ils conservent en général la trace des racines autour desquelles ils se sont formés, parfois selon plusieurs générations de dépôts ferriques (figure 4.10 D).

### La structure

Malgré la présence d'artéfacts dans les lames minces, il est possible d'observer des agrégats montrant des structures à stabilité variée et reflétant généralement les observations de terrain. La figure 4.11 A illustre un agrégat bien individualisé provenant de l'horizon AS du profil AMB 8B. L'agrégat a une forme nette et est composé de grains du squelette (quartz et oxy-hydroxydes de fer) pris dans la matrice limoneuse du sol. La présence d'une racine traversant l'agrégat

ainsi que des nombreux pellets de déjection dans la porosité témoignent d'une bonne activité biologique dans l'horizon, assurant la stabilité de la structure. La figure 4.11 B en revanche montre un agrégat peu stable provenant de l'horizon Sal du profil BAL 6A. Le squelette est hétérométrique et beaucoup plus abondant que dans l'agrégat précédent. De plus, la matrice sablo-limoneuse du sol est moins propice à assurer la cohésion des agrégats. Le phénomène de striation de la matrice fine du sol est visible par l'orientation des argiles autour des grains du squelette (granostratification) ou autour de la porosité (porostriation), suite aux processus d'humectation-dessiccation voire dans certains cas spécifiques de tri et d'orientation des grains suite à des alternances gel-dégel dans le sol (figure 4.11 C et D). Ce dernier processus peut également être responsable de la ségrégation de la matrice du sol (grains du squelette et fraction fine) et provoquer une distribution en bandes des grains de quartz. Les bandes, orientées parallèlement à la surface du sol dans le profil AMB 6 à 27 cm de profondeur, sont vraisemblablement héritées d'une période bien plus froide qu'actuellement (figure 4.11 E et F).

### Squelette et substrat

La taille, la composition et la répartition du squelette dans la matrice du sol peuvent être typiques d'un type de substrat ou de formation superficielle. La moraine d'origine alpine du profil BAL 6A contient des fragments de roche de toutes tailles (figure 4.11 B), alors que les sédiments fluvio-glaciaires situés au fond du profil CHX ne contiennent que des grains de sable triés auxquels s'adsorbent des particules argileuses. Les loess du profil BAL 2 comprennent une fraction de quartz très fins mesurant entre 20 et 30 µm de diamètre (figure 4.12 A et B). Les quartz issus des loess pris dans le dépôt de surface (*cover-bed*) des Amburnex (profil AMB 3) se distribuent en deux populations distinctes de grains mesurant respectivement 20-30 µm et 80-100 µm (figure 4.12 C et D). Finalement, le *cover-bed* situé en bas de la toposéquence des Amburnex (profil AMB 9) présente les mêmes populations de quartz que le profil AMB 3, auxquelles s'ajoute une fraction grossière de grains arrondis mesurant entre 350 et 500 µm de diamètre (figure 4.12 E et F). Des fragments de calcédoine, variété fibreuse cryptocrystalline du quartz formée par pseudomorphose d'autres minéraux ou de matière organique dans les roches sédimentaires (ARBÉY, 1980 ; SCHOLLE & ULMER-SCHOLLE, 2003), sont observés dans certaines roches et marnes calcaires de l'Hauterivien (AMB1.4-R) et du Valanginien (AMB6 LM1). Des grains de calcédoine de taille généralement > 200 µm sont également retrouvés dans les horizons superficiels des sols des Amburnex (figure 4.10 A et B).

### 4.3.2. Caractérisation de la fraction < 2 µm (TEM)

La fraction < 2 µm décarbonatée de certains échantillons de sol a été étudiée plus finement grâce à des observations réalisées au microscope électronique à transmission (TEM), complétées par des analyses de micro-diffraction électronique et des mesures chimiques semi-quantitatives en énergie dispersive (sonde EDS). Les signaux en Cu et C parfois visibles sur les spectres EDS proviennent du support utilisé lors des observations (grille en cuivre couverte d'un microfilm en carbone). Les observations sont présentées en fonction du type de particule caractérisé (phyllosilicates, oxy-hydroxydes de fer, etc.) et permettent d'illustrer certains des résultats minéralogiques présentés plus haut.

#### Les phyllosilicates

Les minéraux primaires hérités des matériaux géologiques présentent une bonne cristallinité caractérisée par la netteté et l'individualisation des points lumineux de micro-diffraction sur les micro-diffractogrammes (absence de halo et distances interréticulaires des familles de plan

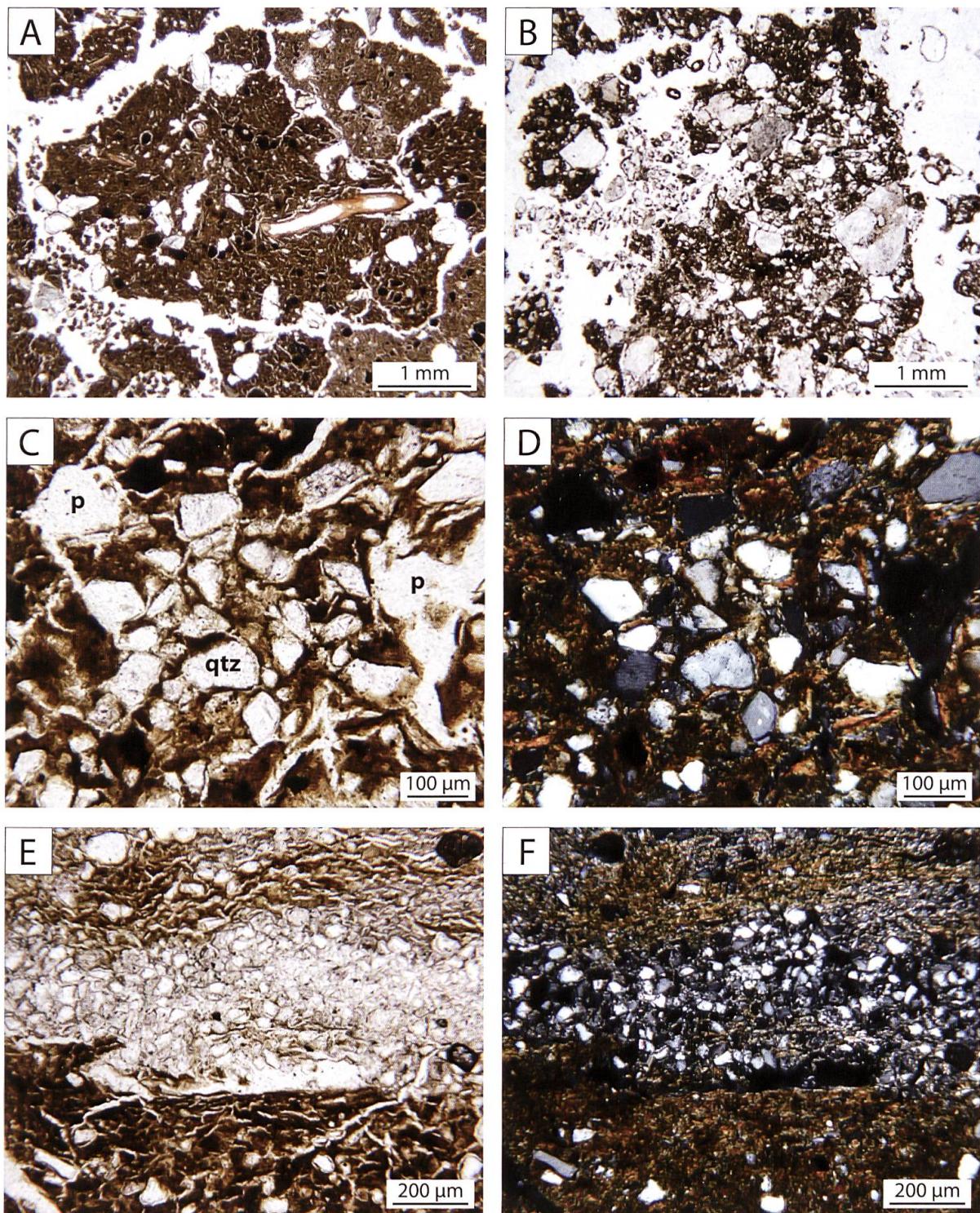


Figure 4.11. Agrégats et traits pédologiques illustrant différents aspects représentatifs de la structure des sols observés en lame mince. p = pore; qtz = quartz. A) Agrégat aux contours bien définis dans l'horizon AS du profil AMB 8B (échantillon AMB8B LM6; 3 cm de profondeur). Le squelette composé de grains de quartz et de petits nodules d'oxy-hydroxydes de fer est mélangé à la matrice fine du sol. L'activité biologique se manifeste par la présence d'une racine (en coupe) traversant l'agrégat et par les nombreux pellets envahissant la porosité. B) Agrégat peu stable dans l'horizon Sal du profil BAL 6A (échantillon BAL6A LM3; 32 cm de profondeur). Le squelette hétérométrique est abondant et mal intégré à la matrice du sol. C) Organisation des grains du squelette (quartz), des pores et de la matrice dans l'horizon Sg2 du profil AMB 5A (échantillon AMB5A LM3; 42 cm de profondeur). D) Même image en XPL. L'assemblage de biréfringence montre une organisation grano- et porostrriée autour des grains et des pores, résultant des contraintes exercées par les cycles de gel-dégel ou d'humectation-dessiccation. E) Distribution en bande du squelette (grains de quartz) et de la matrice du sol dans l'échantillon AMB6 LM6 (27 cm de profondeur) formée lors de cycles de gel-dégel. Les bandes sont orientées parallèlement à la surface du sol. F) Même image en XPL montrant la granostriation de la matrice du sol.

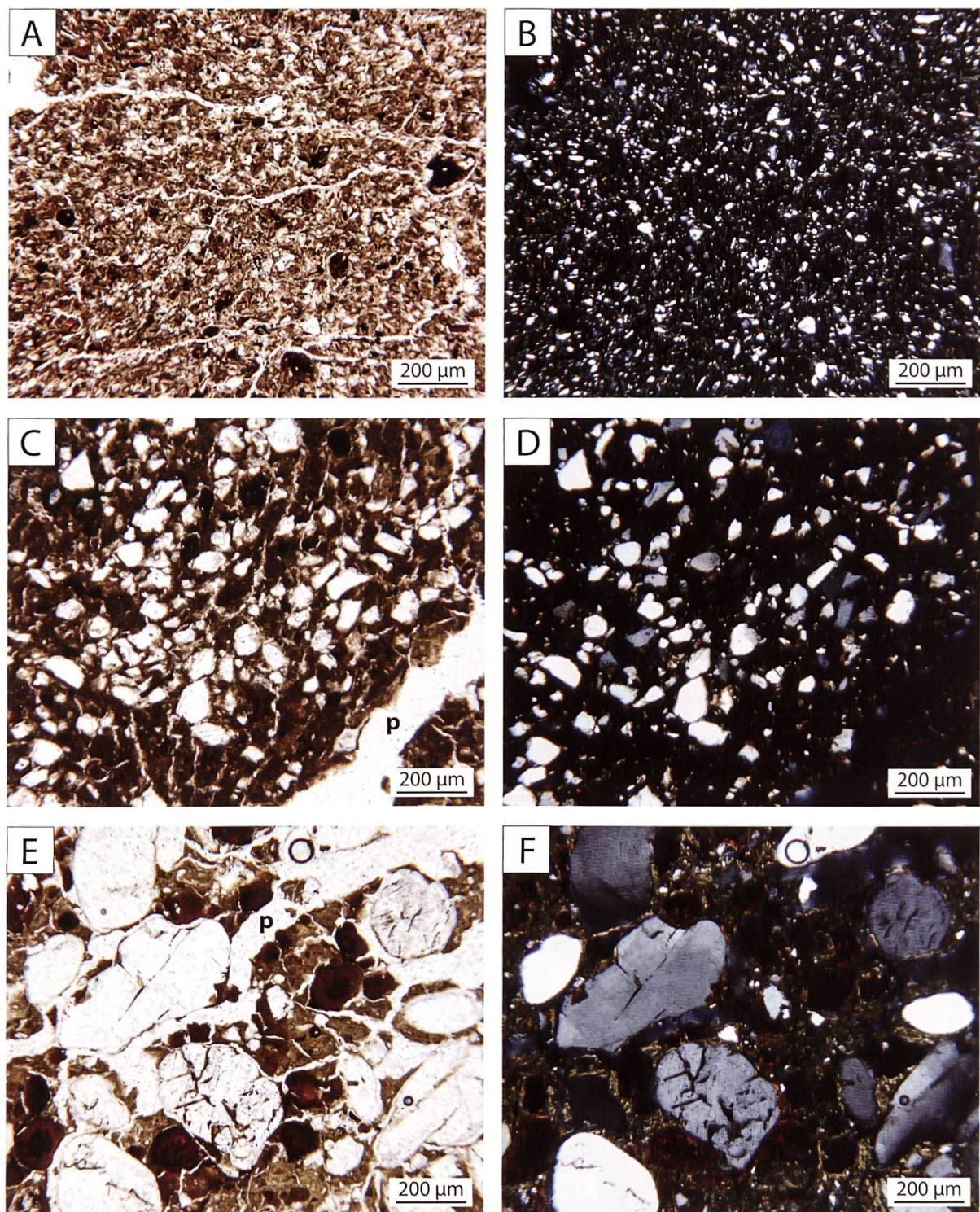


Figure 4.12. Caractérisation de différents types de formations superficielles en fonction de leur squelette (essentiellement des grains de quartz) observé en lame mince. Les échelles sont similaires pour toutes les images. p = pore. A) Dépôt de loess remaniés du profil BAL 2 (échantillon BAL2 LM1; 19 cm de profondeur) contenant des grains de quartz fins homométriques d'un diamètre compris entre 20 et 30 µm. B) Même image en XPL. C) Dépôt de cover-bed en surface du profil AMB 3 (échantillon AMB3 LM1; 30 cm de profondeur). Deux fractions de grains de quartz sont visibles, comprises respectivement entre 20-30 µm et 80-100 µm. D) Même image en XPL. E) Dépôt de cover-bed du profil AMB 9 (échantillon AMB9 LM2; 13 cm de profondeur) montrant une fraction de grains de quartz grossiers d'un diamètre mesurant entre 350 et 500 µm de diamètre. Des grains d'oxy-hydroxydes de fer de 100-200 µm de diamètre sont également présents. F) Même image en XPL. L'assemblage de biréfringence est granostrié.

bien déterminées ; figures 4.13 et 4.14). La composition chimique des minéraux, notamment le rapport entre les différents éléments présents, ainsi que dans certains cas la forme des particules, permettent l'identification des divers phyllosilicates. La kaolinite, de forme typiquement hexagonale (SUDO *et al.*, 1981), est composée exclusivement de Al et Si en proportions similaires, ainsi que de O (figure 4.13 A; ELERT *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2012). La smectite a une forme moins bien définie que la kaolinite et peut présenter des compositions chimiques variant en fonction des espèces minérales appartenant au groupe des smectites (proportions différentes en Na, Ca, Fe; figure 4.13 B; ELERT *et al.*, 2008; GILLOT *et al.*, 2000). Certaines chlorites observées (comme illustrée en figure 4.13 C) contiennent du Mg et du Fe en proportions similaires. Trois minéraux du groupe des micas sont différenciés en fonction de leur composition chimique (figure 4.14). La phengite contient des proportions équivalentes de Al et Si, ainsi que du K (figure 4.14 A; SILVA *et al.*, 2012). La muscovite affiche en revanche une concentration en Si supérieure à celle en Al, également accompagnées par K (THOMAS *et al.*, 1993). La particule épaisse de muscovite illustrée à la figure 4.14 B subit une dissolution préférentielle parallèle à la structure en feuillets (MURAKAMI *et al.*, 2003). Pour finir, la biotite comprend un rapport Si/Al > 1 et contient également du K, du Mg et du Fe (figure 4.14 C; TABOADA *et al.*, 2006). Les échantillons analysés proviennent d'horizons de surface et de profondeur des sols et les particules illustrées montrent pour certaines des traces d'altération, comme par exemple des fragments se détachant des minéraux primaires et restant adsorbés à la surface des phyllosilicates (figure 4.13 B et figure 4.14 A).

### Les oxy-hydroxydes de fer

Des oxy-hydroxydes de fer sont observés dans la majorité des échantillons. Leur forme et leur état de cristallinité permettent généralement de différencier leur origine héritée ou néoformée dans les sols. La figure 4.15 A et B montre des oxy-hydroxydes de fer cryptocrystallins (donc par définition présentant une mauvaise cristallinité). Ce sont probablement des micro-cristaux de ferrihydrite néoformée en conditions édaphiques (USMAN *et al.*, 2012; SIMAS *et al.*, 2006). La figure 4.15 C illustre des oxy-hydroxydes de fer en forme de baguettes observés dans l'échantillon BAL2 20-30, dont l'origine (héritée ou néoformée) reste incertaine. Les particules d'oxydes de fer relativement bien cristallisées observées par exemple en figure 4.15 D pourraient être constituées d'hématite (USMAN *et al.*, 2012) et seraient par conséquent héritées de sédiments remaniés. Finalement, deux morphologies distinctes d'oxy-hydroxydes de fer provenant du résidu insoluble de la roche AMB7-R ont été observées (figure 4.15 E et F). Certains de ces oxy-hydroxydes, en forme de granules, sont caractérisés par une mauvaise cristallinité, alors que les oxy-hydroxydes en forme d'étoile, typiques de la goethite (SUDO *et al.*, 1981), sont probablement hérités car en tout point comparables aux observations faites sur les formes précipitées en environnement marin (TAITEL-GOLDMAN & SINGER, 2002).

### Autres observations

D'autres types de particules ont été observés, comme par exemple des composés organiques, des grains de quartz, des amas de silice amorphe ou des particules de fer d'origine anthropique, mais ne sont pas illustrés ici. Des billes de nickel prises dans un réseau de molécules organiques ont été identifiées dans un horizon de surface du profil AMB 3 (figure 4.16 A). Leur origine est attribuée à de la pollution atmosphérique actuelle. Des oxydes de titane ont été observés dans un échantillon de moraine alpine (figure 4.16 B), ainsi que dans certains matériaux lithologiques du Berriasien (roche AMB3.1-R) et du Valanginien (marnes d'Arzier, échantillon AMB6 marnes). Les observations au TEM ont aussi permis d'observer certaines fractions très fines

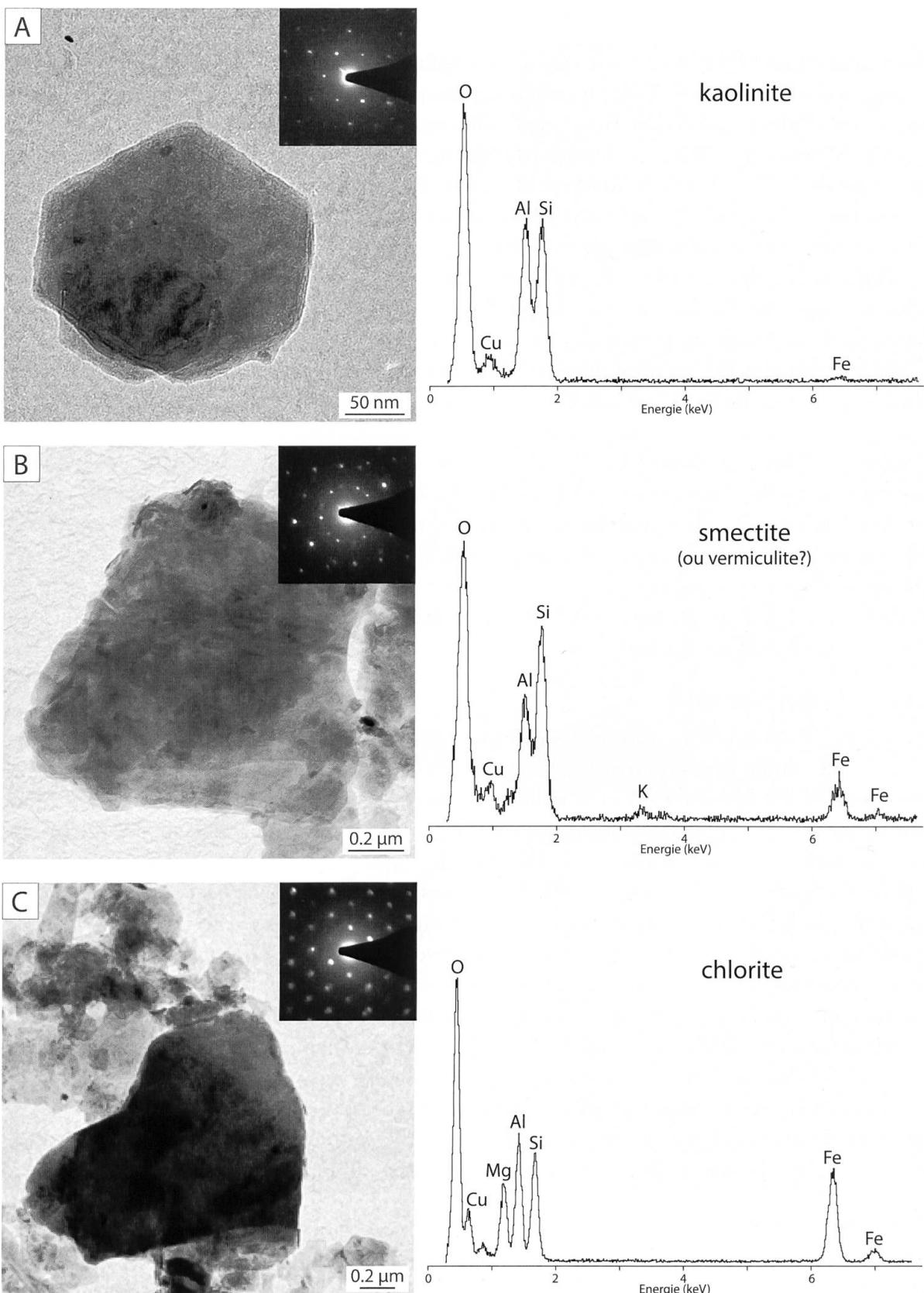


Figure 4.13. Micrographes TEM, figures de microdiffraction et spectres EDS de phyllosilicates provenant d'échantillons de sol des Amburnex et de Ballens. Les pics de Cu visibles dans les spectres EDS sont dus au support utilisé lors de l'analyse. A) Particule de kaolinite présentant une forme typique hexagonale (échantillon AMB3 10-15). B) Smectite (ou vermiculite ?) contenant du Fe et de faibles quantités de K (échantillon AMB1 10-20). Des fragments se détachent du cristal et restent adsorbés à la surface du phyllosilicate. C) Cristal de chlorite riche en Fe et en Mg (échantillon BAL6A 60-80).

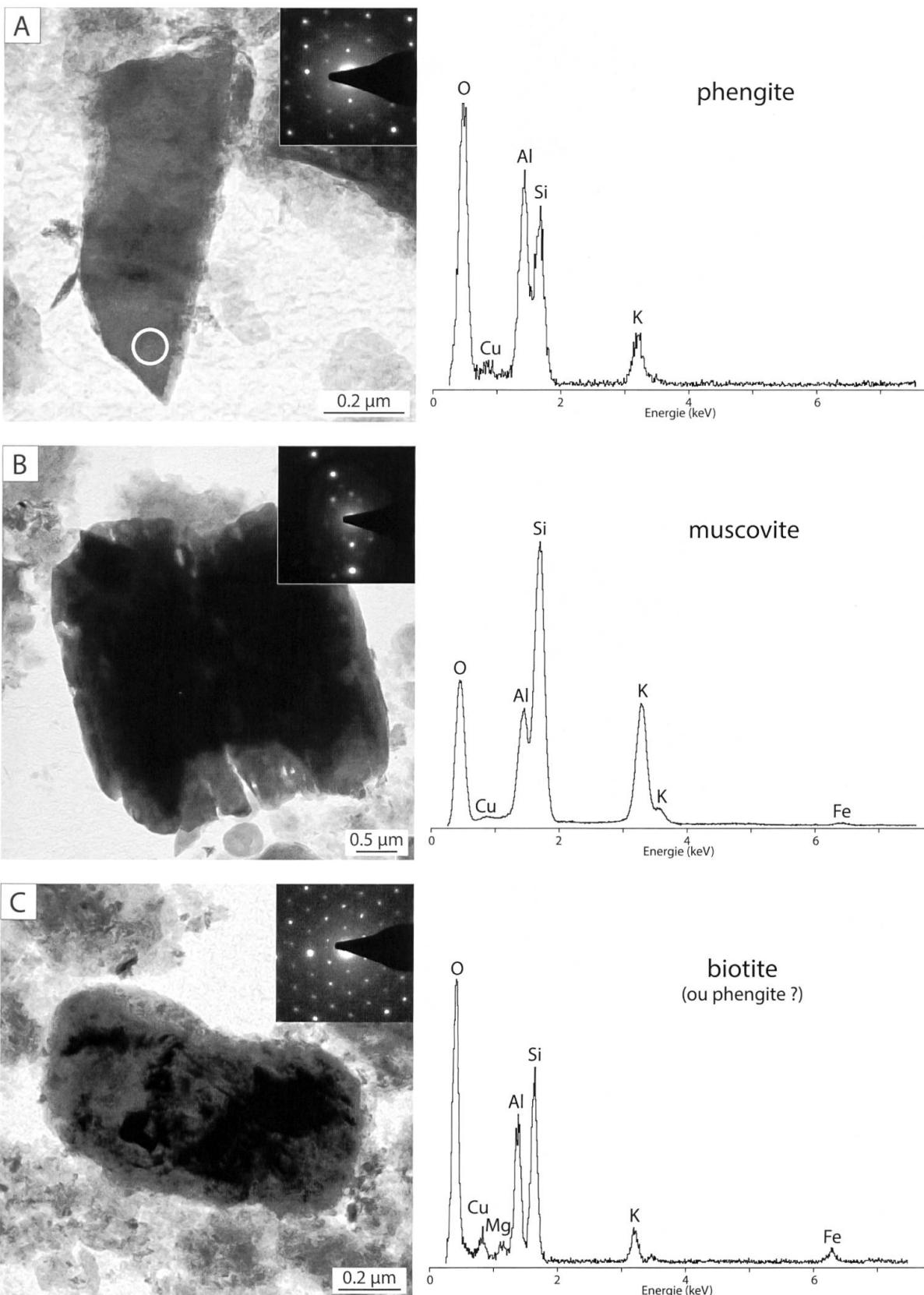


Figure 4.14. Micrographes TEM, figures de microdiffraction et spectres EDS de phyllosilicates du groupe des micas observés dans des échantillons de sol des Amburnex et de Ballens. A) Particule de phengite (échantillon AMB1 10-20). Un faisceau de feuillets est en train de se détacher du cristal (à gauche). Des oxydes de fer forment des épitaxies adsorbées à la surface de la particule (zones plus sombres). L'emplacement de la mesure de la composition chimique est indiqué par un cercle blanc. B) Particule de muscovite montrant des figures de dissolution parallèles (échantillon AMB1 10-20). L'épaisseur importante du cristal (plusieurs feuillets superposés mais non parallèles entre eux) perturbe le signal de microdiffraction. C) Particule de biotite (ou de phengite ?) contenant du Mg, K et Fe (échantillon BAL3A 50-70).

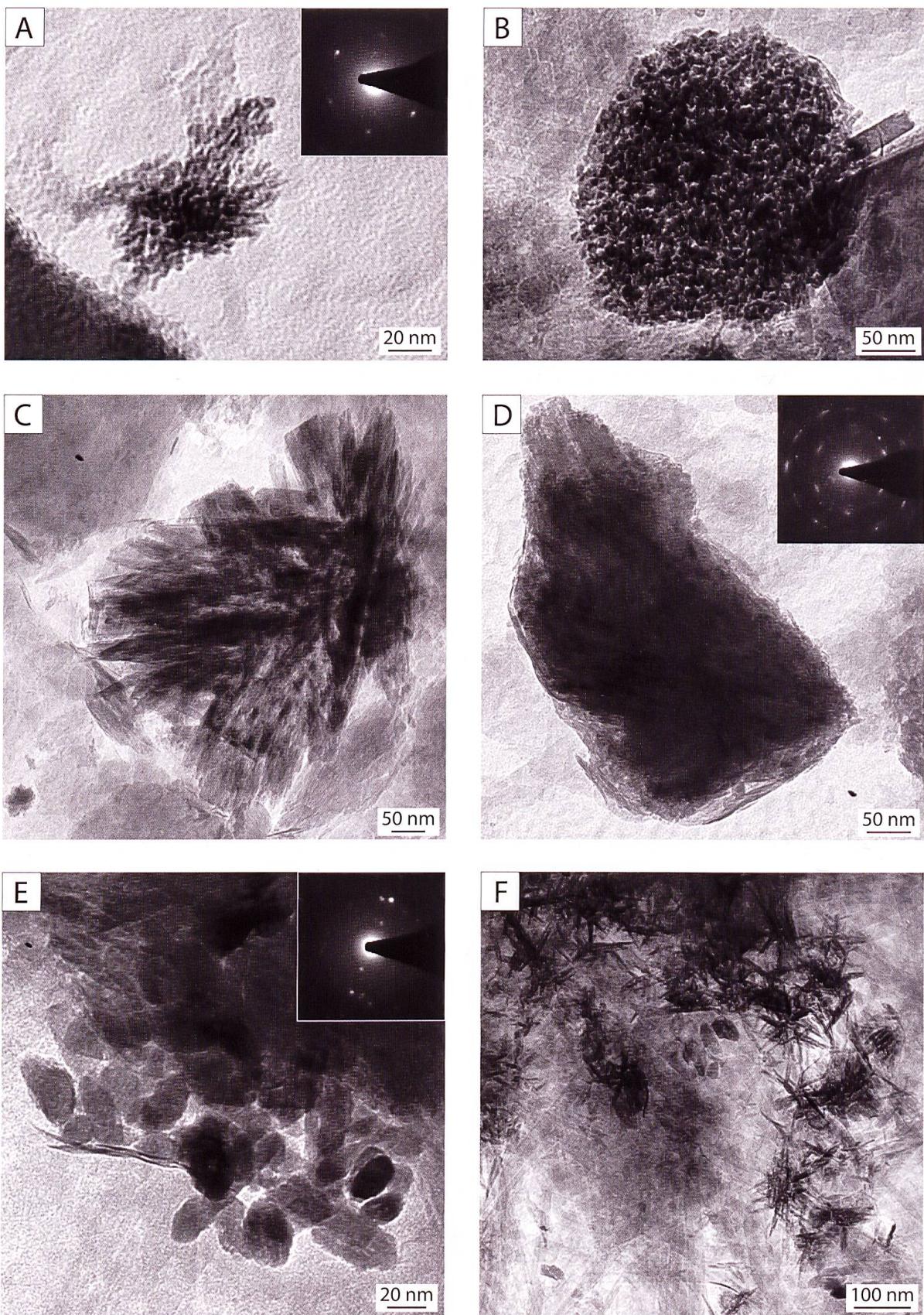


Figure 4.15. Images TEM illustrant les différentes morphologies d'oxy-hydroxydes de fer observées dans les sols et les roches des Amburnex et de Ballens. A) et B) Oxy-hydroxydes de fer cryptocrystallins (ferrihydrite) présentant une mauvaise organisation réticulaire par définition (figure de microdiffraction floue; échantillon AMB1 10-20). C) Cristaux en forme de baguettes dont l'origine reste incertaine (échantillon BAL2 20-30). D) Particule d'oxydes de fer présentant une bonne cristallinité (probablement de l'hématite; échantillon AMB1 10-20). E) Oxy-hydroxydes de fer en forme de granules présentant un mauvais état de cristallisation (échantillon AMB7-R). F) Cristaux de goethite en forme d'étoiles (échantillon AMB7-R).

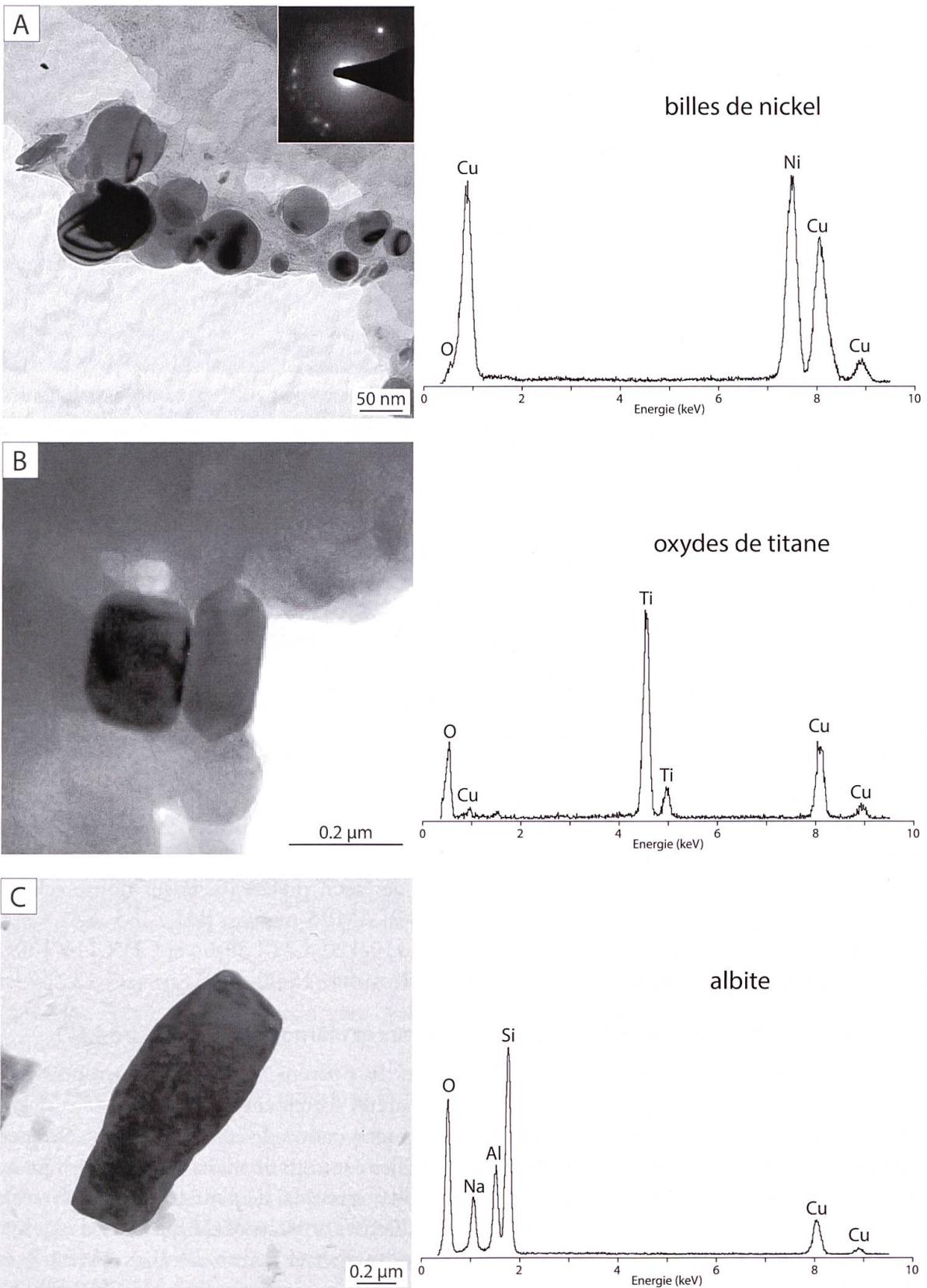


Figure 4.16. Micrographes TEM, figures de microdiffraction et spectres EDS de particules observées dans des échantillons de sol des Amburnex et de Ballens. A) Billes de nickel probablement d'origine anthropique (pollution atmosphérique) adsorbées sur un filament organique (échantillon AMB3 10-15). B) Oxydes de titane automorphes pris dans un agrégat organique observé dans un sol sur moraine alpine (échantillon BAL6A 10-20). C) Particule d'albite provenant du même échantillon.

d'éléments constitutifs des cortèges de minéraux primaires comme par exemple une particule d'albite (SIMAS *et al.*, 2006) provenant d'une moraine alpine (figure 4.16 C).

#### 4.3.3. Exoscopie des sables de quartz (SEM)

L'observation de la forme des grains de sable de quartz, de l'état de leur surface et de leurs arêtes, ainsi que l'identification des marques présentes permettent de caractériser les milieux naturels dans lesquels ces grains ont séjourné ou ont été transportés. Dans le cadre de la présente étude, cette méthode a été utilisée dans le but premier de répondre à la question de l'origine des sables présents dans les horizons superficiels des sols (notamment au site des Amburnex). Puis, les observations se sont étendues à d'autres types d'échantillons (marnes, moraines) afin de pouvoir comparer les marques identifiées dans un contexte local. Les sources potentielles des sables de quartz dans les deux sites étudiés sont les roches calcaires en place (plus particulièrement les niveaux marneux), les moraines et les apports éoliens. Une fois immobilisés dans les sols, les grains subissent l'action de la pédogenèse. Cependant, les sables ne sont que rarement homogènes et diverses populations de grains aux origines et aux histoires distinctes peuvent se retrouver dans un même dépôt. De plus, le rattachement de certaines marques identifiées à un milieu de transport précis est parfois difficile, car différents mécanismes peuvent avoir des effets similaires sur les grains (par exemple les traces de choc en cupule peuvent être observées sur des quartz torrentiels, éoliens, glaciaires, ou évoluant sur des plages battues; LE RIBAULT, 1977). C'est pourquoi, dans ce travail, la méthode de l'exoscopie des sables de quartz est utilisée dans le but de caractériser les matériaux sédimentaires présents et d'apporter des éléments supplémentaires à l'identification de l'origine de ces dépôts, plutôt que comme preuve formelle et absolue (une application plus rigoureuse et quantitative de la méthode serait alors requise). De plus, l'observation d'intersections entre divers types de marques, ainsi que de l'état de conservation de ces marques (contours nets, arrondis, émuossés, etc.), permet d'établir une chronologie relative de l'histoire des grains.

Les résultats des observations présentés ci-dessous décrivent les formes et marques caractéristiques des milieux de dépôt ou de transport identifiés sur les sables provenant des deux sites d'étude. L'observation des grains a été réalisée de façon préférentielle sur douze échantillons sélectionnés (AMB3 0-5, AMB9 0-3, AMB4-R, AMB6 marnes, BAL1 0-5, BAL2 30-40, BAL3A 0-5, BAL3B 0-5, BAL4B 10-20, BAL6A 110-120, CHX 30-65 et CHX 110-130). L'identification des marques a été réalisée d'après LE RIBAULT (1977).

#### Grains provenant des substrats lithologiques marneux et marno-calcaires (figure 4.17)

Les grains observés présentent des formes très variées. Ils peuvent être « cariés », arrondis, subanguleux ou automorphes, tout en exprimant des arêtes fortement émuossées. Les surfaces sont remaniées par des processus de dissolution et de précipitation de la silice (écailles siliceuses convexes) et les anciennes marques de choc montrent des contours arrondis et altérés indiquant une évolution poussée des grains (par exemple en milieu infratidal de plate-forme carbonatée). Les grains cariés présentent sur leur surface de nombreuses anfractuosités tapissées d'oxy-hydroxydes de fer. Les échantillons de référence sont les marnes et marno-calcaires AMB4-R et AMB6 marnes. Les traits caractéristiques donnés ci-dessus se retrouvent dans les échantillons AMB3 0-5, AMB9 0-3, BAL1 0-5, BAL2 30-40, BAL3A 0-5, BAL3B 0-5, BAL4B 10-20, BAL6A 110-120 et CHX 110-130.

Les roches du Berriasien et du Valanginien contiennent des niveaux riches en grains de quartz détritiques (taille située entre 10 et 200 µm) issus de l'érosion des massifs cristallins continentaux et transportés par les fleuves ou le vent avant leur sédimentation marine (BLANC,

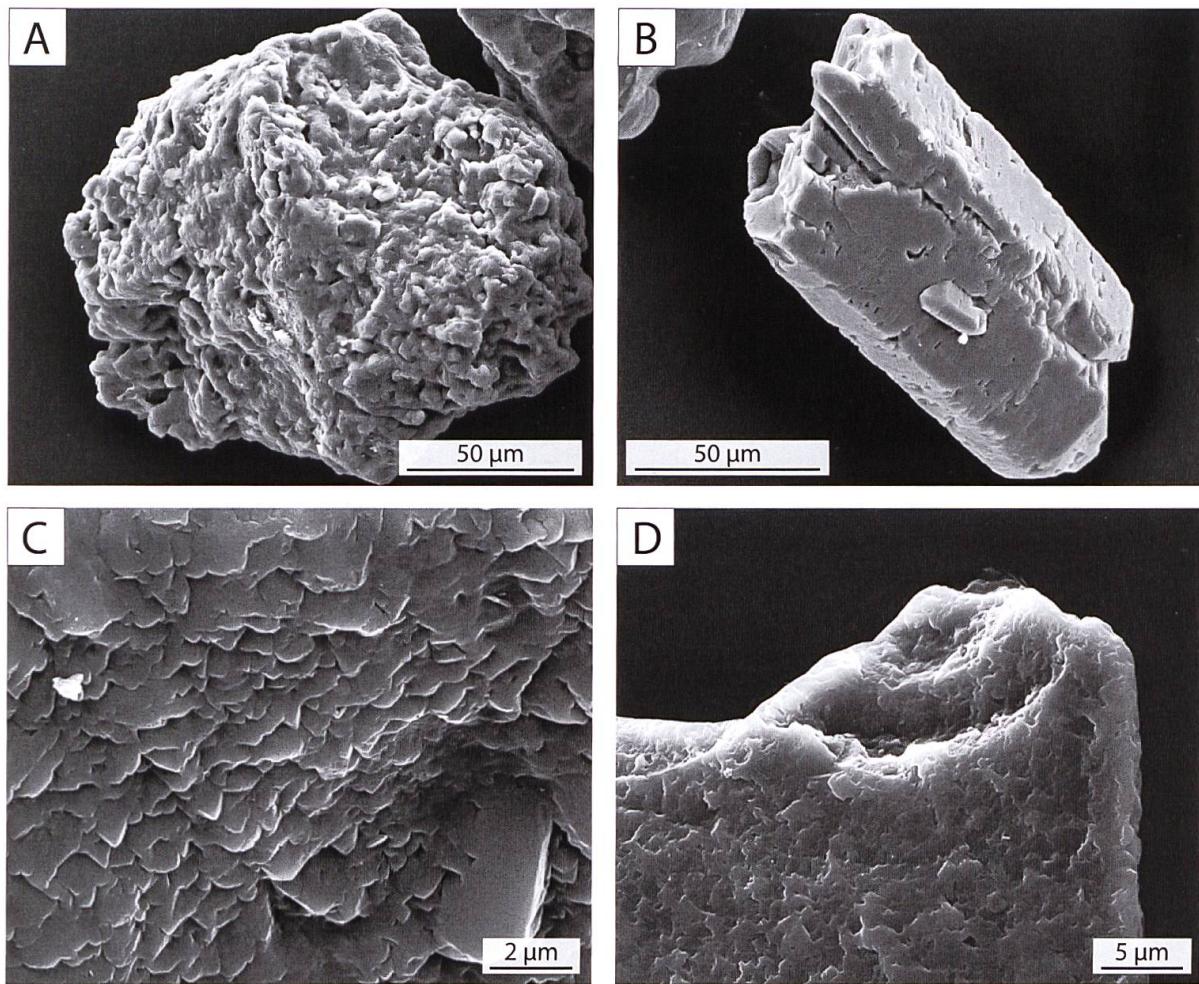


Figure 4.17. Images SEM montrant les formes de grains de quartz issus des substrats lithologiques calcaires et les marques observées à la surface des grains. A) Grain « carié » provenant des marno-calcaires du Berriasien (échantillon AMB4-R), B) Grain automorphe avec inclusion. Les arêtes sont émuossées et les surfaces présentent de nombreuses et profondes traces de dissolution de la silice (marnes du Valanginien, échantillon AMB6 marnes). C) Ecailles siliceuses convexes (marnes du Valanginien, échantillon AMB6 marnes). D) Ancienne marque aux contours fortement altérés (échantillon BAL2 30-40).

1996). La majorité des grains (80 %) observés par l'auteur présente également des surfaces couvertes d'écailles siliceuses convexes coalescentes, liées à des phénomènes de précipitation de la silice (LE RIBAULT, 1977).

#### Grains transportés dans les moraines (figure 4.18)

Les grains sont de forme anguleuse, subanguleuse, en esquille ou « cariée ». Les surfaces présentent de nombreuses traces d'impact et de chocs violents, des cassures conchoïdales et de grandes traces de choc en croissant. Les marques sont fraîches, aux arêtes nettes et vives. Les échantillons de référence sont BAL6A 110-120, CHX 30-65 et CHX 110-130. Ces traits caractéristiques se retrouvent également dans les échantillons AMB3 0-5, AMB9 0-3, BAL1 0-5, BAL3A 0-5, BAL3B 0-5 et BAL4B 10-20.

Les figures de broutage (figure 4.18 F) sont généralement attribuées au transport glaciaire. Dans les échantillons étudiés, de telles marques sont visibles sur certains grains provenant des échantillons de sol, mais elles ne sont en revanche pas observées sur les grains issus des moraines. Cependant, l'origine de telles marques pourrait également être due à de fortes collisions entre les grains réalisées dans d'autres environnements à forte énergie (dunes, torrents, zones littorales

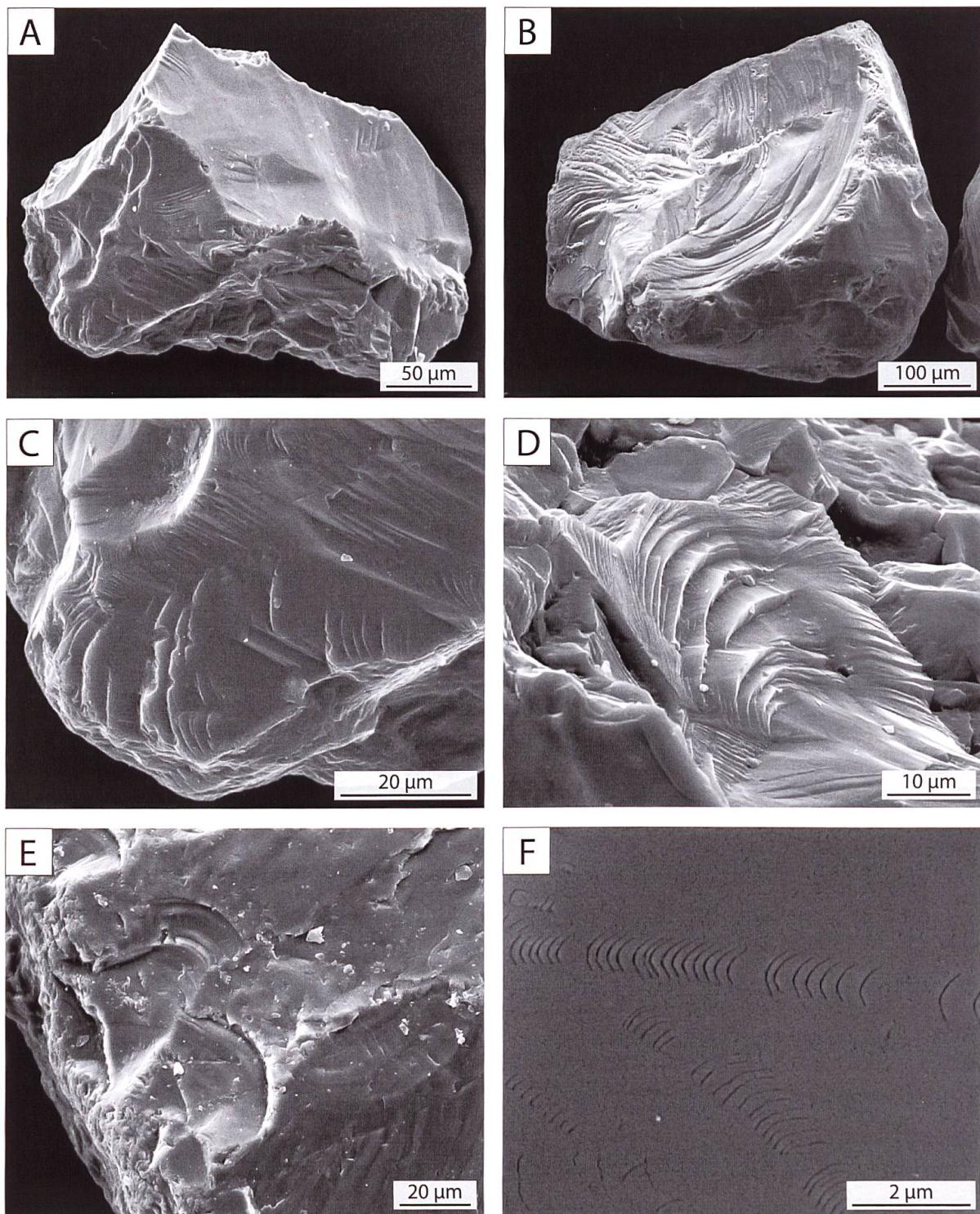


Figure 4.18. Images SEM illustrant les formes de grains de quartz et les marques de surface caractéristiques des transports en environnements glaciaires. A) Grain anguleux aux arêtes vives et aux marques nettes (moraine alpine, échantillon BAL6A 110-120). B) Grain présentant une grande face avec figure de cisaillement (dépôt fluvioglaciaire, échantillon CHX 110-130). C) Cassures conchoïdales aux contours nets (moraine alpine, échantillon BAL6A 110-120). D) Figures « en gradins » liées aux effets de cisaillement (moraine mixte, échantillon CHX 30-65). E) Traces de percussion en croissant montrant des fractures conchoïdales (moraine alpine, échantillon BAL6A 110-120). F) Figures de broutage à l'origine controversée (horizon superficiel de sol, échantillon AMB3 0-5).

et marines, etc.). Ces marques, invisibles dans un premier temps, seraient révélées suite à une dissolution préférentielle de la silice le long de ces zones de faiblesse (PETERKNECHT & TIETZ, 2011). Par conséquent, il serait normal de ne pas trouver de figures de broutage sur des grains provenant de sédiments « frais » (par exemple les moraines), mais de les observer au contraire sur des grains ayant enduré une certaine altération de surface. Toutefois, l'interprétation glaciaire de ces marques reste ambiguë.

#### Grains transportés par le vent (figure 4.19)

Les grains sont arrondis, sub-arrondis ou subanguleux aux arêtes émoussées. Les marques spécifiques sont essentiellement constituées de V de choc et de traces en croissant, généralement localisées sur les arêtes. Les échantillons de référence proviennent des loess du Mont Tendre, dans le Jura suisse (NUSSBAUMER, 2012). Ces traits caractéristiques se retrouvent dans les échantillons AMB3 0-5, AMB9 0-3, BAL1 0-5, BAL2 30-40 et BAL4B 10-20.

Une éolisation brève des grains de sable sur 1-2 km serait suffisante pour produire environ 10'000 chocs par grain (LE RIBAULT, 1977). Les traces d'impact, même de petite taille, sont bien marquées et présentent toujours un contour très franc et anguleux. Un transport éolien de

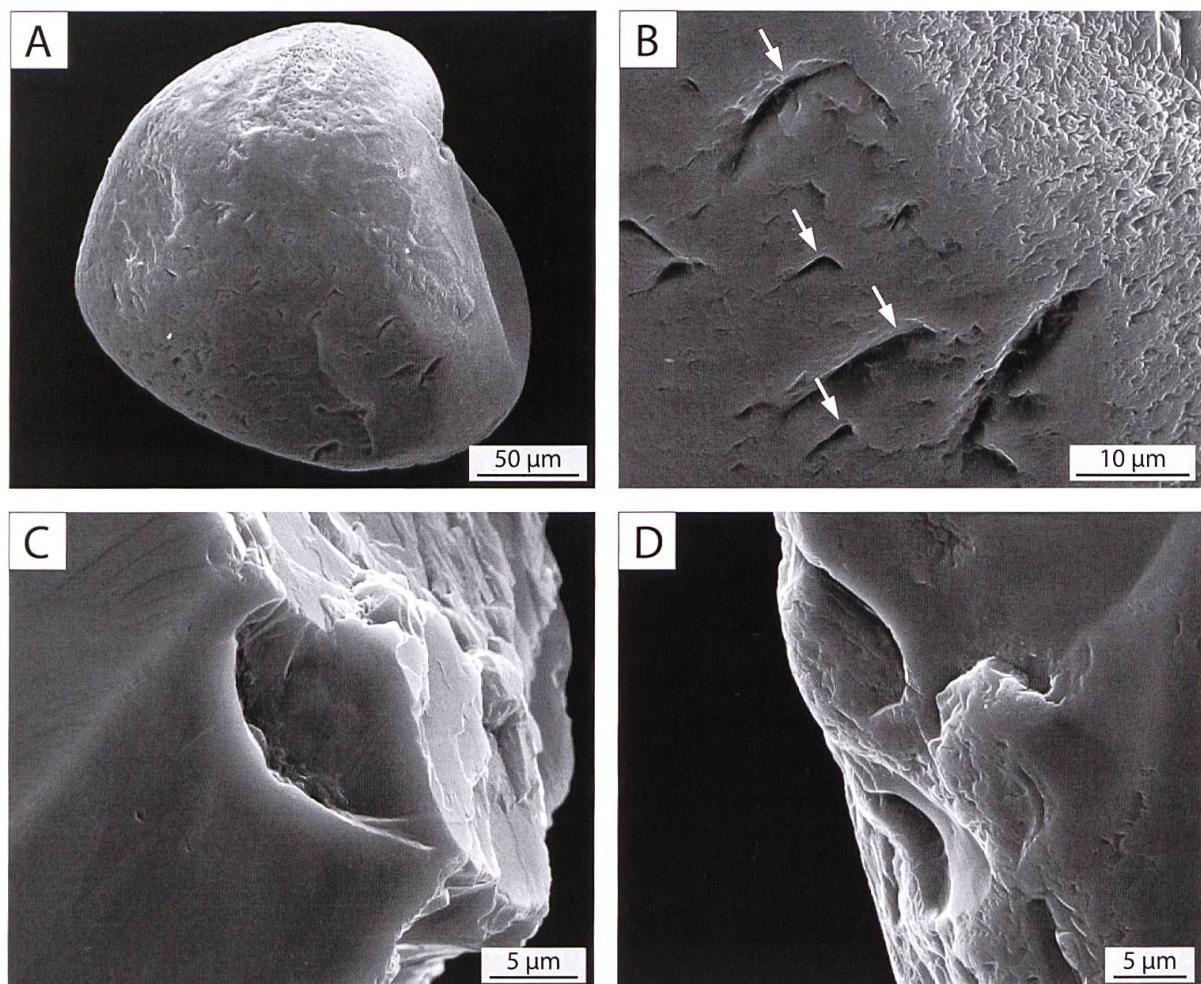


Figure 4.19. Images SEM montrant la forme d'un grain de quartz et les marques de surface attribuées au transport éolien. A) Grain arrondi présentant de nombreuses traces d'impact sur sa face inférieure (horizon superficiel de sol, échantillon AMB9 0-3). B) Détail de A montrant des V de chocs aux bords émoussés (flèches). Sur la droite de l'image, la surface est couverte d'écailles siliceuses. C et D) Traces de choc en croissant aux contours nets (sol sur loess remobilisé, échantillon BAL2 30-40).

plus longue durée entraîne progressivement un rabattement des angles et une atténuation des arêtes, menant à un arrondissement de la forme des grains. Par exemple, les grains provenant de dépôts loessiques de l'est de l'Europe présentent des formes sub-arondies mais conservent encore des marques antérieures à leur transport éolien (TIMIREVA & VELICHKO, 2006), alors que les grains désertiques sont arrondis et couverts de traces de choc (FUYUAN *et al.*, 2012; KENIG, 2006; KRINSLEY *et al.*, 1976).

Le grain présenté à la figure 4.19 A et B présente une forme arrondie et des V de choc aux contours émuossés, indiquant un transport éolien de longue durée, antérieur à une phase d'immobilisation et de précipitation de la silice (écailles siliceuses convexes). Au contraire, les marques représentées à la figure 4.19 C et D sont fraîches et signifient un transport récent dans l'histoire du grain. De plus, la netteté des arêtes des grains observée sur ces images suggère un court épisode d'éolisation, qui aurait laissé des traces d'impact mais n'aurait pas suffi à modifier la forme entière du grain. Les marques en croissant visibles sur ces images diffèrent de celles observées à la figure 4.19 E en contexte glaciaire de par le fait qu'elles ne présentent pas de fractures conchoïdales. Elles résultent donc d'un choc unique et non de l'effet de cisaillement provoqué par une forte pression sur le grain au sein d'un sédiment en mouvement.

#### **Grains influencés par les processus de dissolution et précipitation de la silice (figure 4.20)**

Les grains ne présentent pas de formes spécifiques. L'essentiel des marques consiste en une modification des surfaces et des anciennes traces par les processus de dissolution (écailles siliceuses concaves et figures de dissolution) et de précipitation de la silice (globules de silice amorphe). Ces traits caractéristiques se retrouvent dans les échantillons AMB3 0-5, AMB9 0-3, BAL1 0-5, BAL2 30-40, BAL3A 0-5, BAL3B 0-5, BAL4B 10-20 et CHX 110-130.

Les figures de dissolution forment de petits triangles orientés parallèlement (figure 4.20 C). Elles peuvent se développer dans les sols, sous l'action des processus pédogénétiques favorisant la dissolution de la silice. Le développement de figures de dissolution emboîtées et de grandes tailles (figure 4.20 A et B) nécessite une altération intense et de longue durée (sols tropicaux par exemple). Les réseaux de dissolution anastomosés (figure 4.20 D) se développent quant à eux dans les environnements marins. Les globules siliceux (figure 4.20 F) peuvent être observés sur les quartz pédogéniques, mais également sur les grains fluviatiles, intertidaux, diagénétiques, ainsi que sur ceux immobilisés dans les domaines continentaux et côtiers. L'accumulation de globules de silice amorphe mène à la formation d'écailles siliceuses convexes ou de fleurs de silice (sols, environnements deltaïques et de haute plage).

En résumé, l'observation de la surface des grains de quartz provenant d'échantillons choisis des sites des Amburnex et de Ballens montre que la fraction sableuse des sols présente des origines multiples. Certains grains ont des formes « cariées » et présentent des surfaces couvertes d'écailles siliceuses. Ils ressemblent fortement aux grains observés dans les marnes du Valanginien et du Berriasien, ce qui indiquerait une origine autochtone de ces grains. En revanche, la présence de grains aux arêtes vives et aux marques de chocs violents (cassures conchoïdales, figures de cisaillement, etc.) dans certains échantillons de sol suggère une contribution de sables d'origine glaciaire. De plus, des traces fraîches de chocs éoliens identifiées sur quelques grains issus des sols indiquent l'origine allochtone d'une autre fraction de la population des sables. L'exoscopie des sables de quartz provenant des sites d'étude montre bien le mélange de populations de grains d'origines distinctes qui constitue le matériau parental des sols étudiés, mais ne permet cependant pas à ce stade de l'étude de quantifier les contributions des différentes influences.

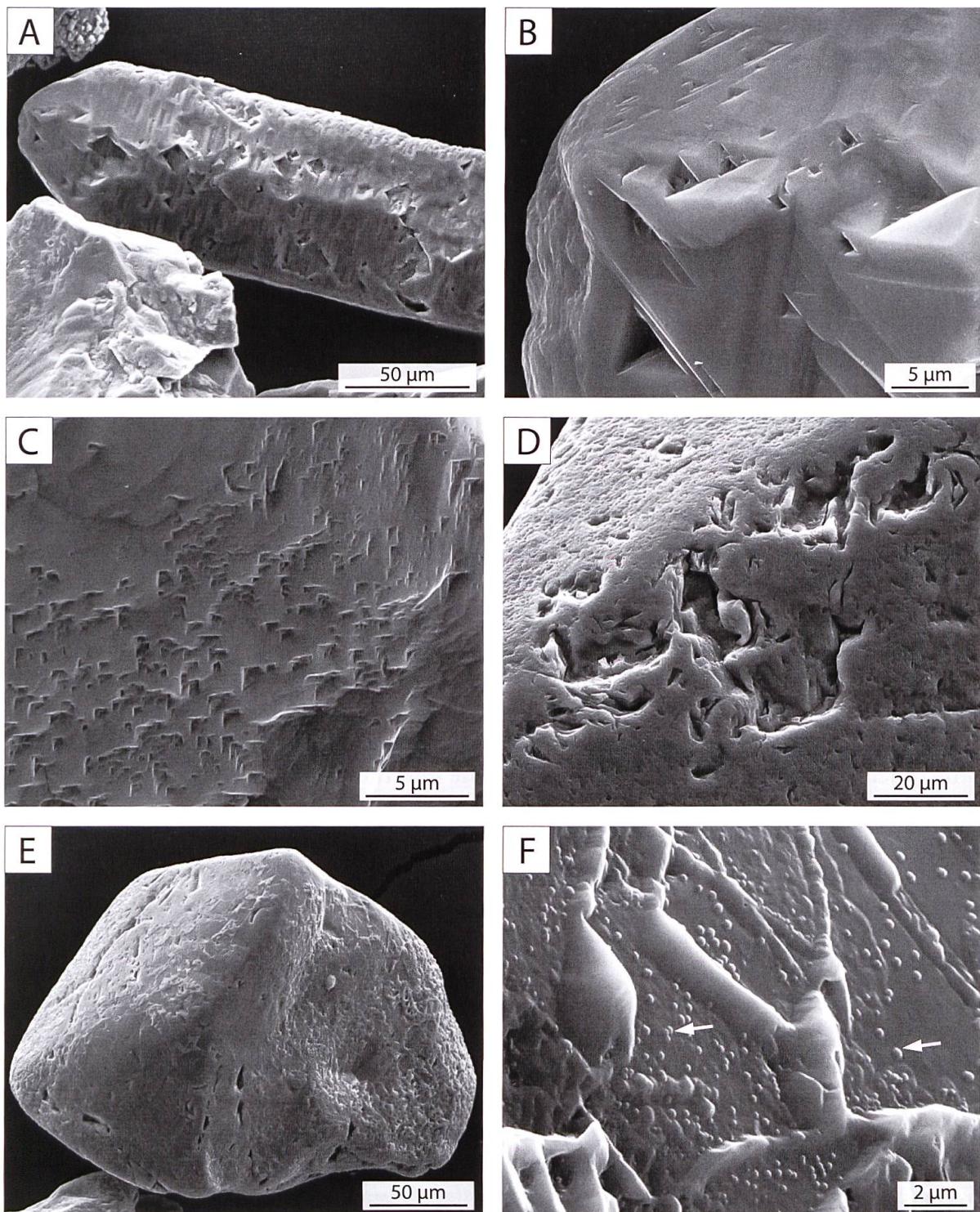


Figure 4.20. Images SEM montrant les marques et les figures issues des processus de dissolution et de précipitation de la silice sur la surface des grains de quartz. A et B) Grain automorphe présentant des figures de dissolution emboîtées bien développées (échantillon BAL3B 0-5). C) Figures triangulaires de dissolution dues aux processus de pédogenèse (échantillon BAL1 0-5). D) Réseau de dissolution anastomosé (échantillon AMB3 0-5). E) Grain arrondi dont la surface est remaniées par des processus de dissolution et de précipitation de la silice (échantillon AMB9 0-3). F) Détail de E montrant deux faciès de précipitation de la silice : des globules de silice amorphe (flèches) et des réseaux de « cordons ».

## **4.4. Description et distribution des matériaux substrat et des formations superficielles le long des deux toposéquences étudiées**

### **4.4.1. Site des Amburnex**

La distribution des formations superficielles le long de la toposéquence des Amburnex est représentée par la figure 4.21. Les matériaux d'origine autochtone (calcaires et marnes des séries géologiques, ainsi que les horizons résultant de leur altération) situés en profondeur sont séparés des dépôts de surface (moraine, cryoclastes, *cover-bed*) par une discontinuité lithologique généralement nette. Les principaux types de formations superficielles identifiés aux Amburnex sont décrits ci-dessous, en fonction des résultats minéralogiques et granulométriques présentés au § 4.2.1.

#### **Matériaux substrat**

Les roches calcaires et les marnes forment une alternance de bancs au sein des niveaux du Berriasien et du Valanginien. Les calcaires durs affleurent par endroits le long de la toposéquence et se délitent en blocs. Les marnes, en revanche, se rencontrent essentiellement en profondeur et sont généralement surmontées d'horizons d'altération *in situ*. Ces horizons ont des caractéristiques similaires aux substrats sous-jacents en termes de composition minéralogique et granulométrique, ce qui suggère un lien génétique entre les matériaux superposés. La principale caractéristique des matériaux autochtones est l'abondante présence de la calcite. En conséquence, l'altération de ces matériaux libère de grandes quantités de calcium et d'ions carbonates dans la solution du sol. L'efficacité du tampon des carbonates permet de maintenir des pH élevés dans les horizons profonds des solums. La fraction résiduelle des matériaux substrat est principalement constituée de quartz, de micas et de smectites et/ou kaolinite, en fonction de la nature des roches (Berriasien ou Valanginien ; ADATTE, 1988 ; PERSOZ, 1982). Les distributions granulométriques du résidu insoluble des matériaux substrat présentent des courbes leptokurtiques pratiquement unimodales dans certains cas, dominées par la fraction limoneuse fine (7-8  $\Phi$ ; 4-8  $\mu\text{m}$ ; § 4.2.3.).

#### **Formations superficielles**

La moraine identifiée au sommet de la toposéquence est carbonatée et contient des fragments de roches calcaires de l'Hauterivien, du Valanginien, du Berriasien, du Purbeckien et du Portlandien. En conséquence, son origine peut être attribuée à un glacier jurassien local. La composition minéralogique et granulométrique de cette moraine carbonatée est similaire à celles des matériaux substrat. Un dépôt de cryoclastes constitué de fragments de calcaire du Berriasien est situé en bas de la pente la plus raide, dans le profil AMB 3 (entre 32 et 70 cm de profondeur). Formés lors d'alternances gel-dégel (processus périglaciaire), les cryoclastes sont pris dans une matrice fine carbonatée issue de l'altération des calcaires et/ou de processus de solifluxion/gélifluxion le long de la pente. La limite supérieure du dépôt est marquée par une *stoneline*, indiquant une nette discontinuité lithologique avec le dépôt sus-jacent. Un dépôt superficiel composé de particules fines, ou *cover-bed*, recouvre toute la toposéquence, exception faite de la zone de plus grande pente où les bancs massifs du Berriasien affleurent (profil AMB 2). Ce dépôt a une épaisseur maximale de 50 cm dans le profil AMB 7 et se distingue des couches sous-jacentes par une limite nette correspondant à une discontinuité lithologique. Le *cover-bed* fut mis en place par des processus de versant (solifluxion et/ou ruissellement) après le retrait des glaciers présents au LGM (position sommitale par rapport à la moraine). Ce dépôt est constitué d'un mélange de matériaux autochtones (produits de l'altération des calcaires) et

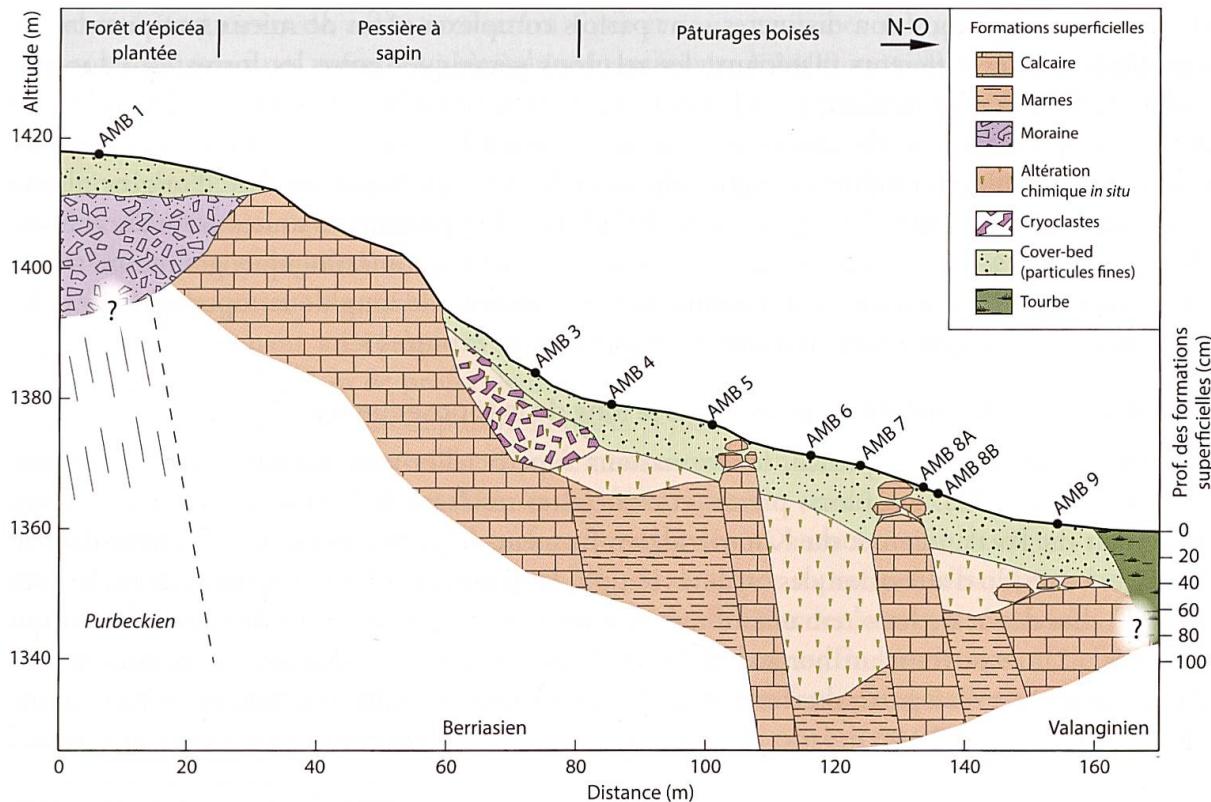


Figure 4.21. Distribution des formations superficielles le long de la coupe de la toposéquence des Amburnex. Les différents matériaux sont représentés d'après JOLY (1997). Le calcaire et les marnes représentent le substrat lithologique en place. Les dépôts morainiques sont liés aux dynamiques glaciaires et la formation de cryoclastes aux environnements périglaciaires. Le cover-bed recouvrant la majorité de la pente est constitué de matériel fin et fut mis en place par des mouvements de solifluxion et/ou de ruissellement le long du versant. Les échelles correspondant à la topographie et à l'épaisseur des formations superficielles sont différentes.

allochtones (löess) remaniés et redistribués le long de la pente. Sa composition minéralogique est exempte de calcite et principalement constituée de quartz et de silicates, ce qui induit des pH bas dans les horizons superficiels des sols. La présence plus élevée de feldspath potassique, de plagioclase sodique et de chlorite dans le dépôt superficiel comparé aux matériaux substrat indique un apport de particules allochtones. En revanche, la présence de kaolinite, de smectites et de micas peut être attribuée à la contribution des matériaux lithologiques. Les courbes granulométriques des échantillons du *cover-bed* sont plurimodales et résultent d'un mélange de différentes populations de grains. Les limons fins ( $6-7 \Phi$ ;  $8-16 \mu\text{m}$ ) dominent les distributions, mais les fractions sableuses sont également bien représentées. L'observation de certains grains de sable au SEM montre le mélange de particules d'origines distinctes (lithologique, morainique, éolienne; § 4.3.3.). L'accumulation de matière organique peu humifiée dans le marais situé en bas de toposéquence est désignée comme « tourbe ». Cette appellation ne correspond probablement pas aux critères pédologiques des horizons histiques (AFES, 2009), mais reflète l'accumulation de matières organiques en milieu réducteur (JOLY, 1997). La présence de ce dépôt, couvert par une végétation marécageuse, est liée aux conditions hydromorphes induites par les marnes hauteriviennes.

#### 4.4.2. Site de Ballens

La distribution des formations superficielles le long de la toposéquence de Ballens est illustrée à la figure 4.22. Les dépôts sont nombreux et variés et les mélanges entre des sédiments

d'origine et de composition distinctes sont parfois complexes. Afin de mieux comprendre les contributions des différents matériaux, les relations génétiques entre les formations superficielles de Ballens sont représentées à la figure 4.23. Trois matériaux de référence, ou *end-members*, sont utilisés à titre de comparaison et représentent les trois pôles du triangle: la roche calcaire, la moraine cristalline d'origine alpine et les lœss du Mont Tendre, d'origine alpine également (NUSSBAUMER, 2012; POCHON, 1978). Les cinq principales unités de substrat étant déjà décrites au § 4.2.2. du point de vue de leur composition minéralogique, granulométrique et géochimique, la distribution des formations superficielles le long de la toposéquence et les relations entre ces formations sont plus particulièrement exposées ici.

### Distribution des formations superficielles le long de la toposéquence

Au sommet de la toposéquence, les formations superficielles sont dominées par le substrat calcaire (figure 4.22). Les blocs, pierres et cryoclastes résultant de la fragmentation des bancs affleurant du Portlandien et du Kimmeridgien forment de petites bosses ou des talus dans le paysage. Le résidu d'altération des calcaires remplit les fissures entre les fragments de roche (site BAL 1). Un dépôt de lœss remanié d'une épaisseur de 40 cm se trouve dans une dépression (site BAL 2), recouvrant un horizon d'altération des cryoclastes calcaires. Les dépôts morainiques sont observés à partir du site BAL 3 et plus bas sur le versant. Les moraines situées à une altitude supérieure à 1 100 m (sites BAL 3 et BAL 4) sont exclusivement constituées de matériel

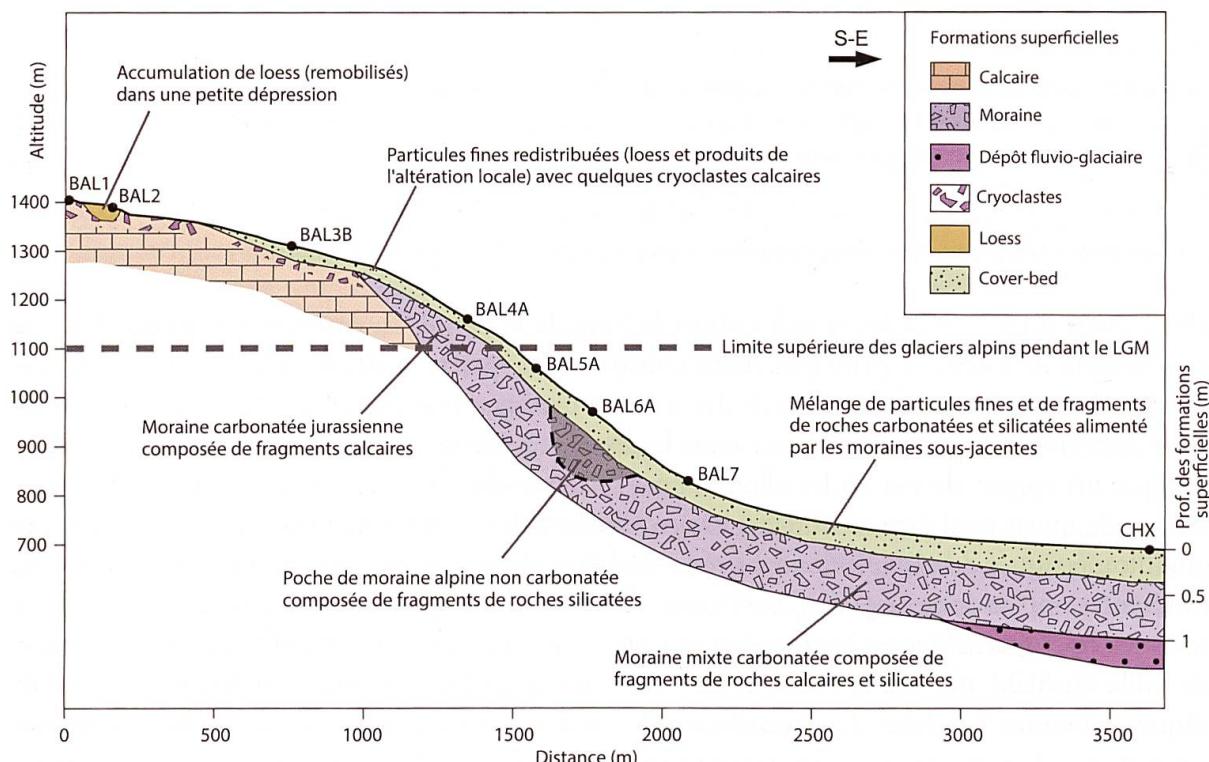


Figure 4.22. Distribution des formations superficielles le long de la coupe de la toposéquence de Ballens d'après une sélection de profils de sol. Les différents matériaux sont représentés d'après JOLY (1997). Le substrat géologique calcaire affleurant est fragmenté par les processus périglaciaires (formation de cryoclastes). L'accumulation de particules éoliennes redistribuées a permis la formation d'un dépôt loessique dans une dépression située en haut de la toposéquence. Le versant est couvert de dépôts morainiques aux compositions variables, en fonction de leur origine. Par-dessus, les cover-beds forment une couche quasi continue dont la composition et la granulométrie évoluent le long de la pente. Les dépôts fluvio-glaciaires du plateau de Bière sont identifiés dans les horizons profonds du site CHX. Les échelles correspondant à la topographie et à l'épaisseur des formations superficielles sont différentes.

carbonaté (fragments de roche et fraction fine) et sont attribuées aux glaciers jurassiens. En revanche, les moraines présentes à une altitude inférieure à 1 100 m (sites BAL 5, BAL 6, BAL 7 et CHX) sont composées de fragments de roches calcaires et silicatées en différentes proportions, pris dans une matrice carbonatée. Ces dépôts, appelés « moraines mixtes », peuvent être des moraines alpines carbonatées (EGLI & FITZE, 2001 ; GUENAT, 1987 ; PORTMANN, 1954) ou résulter de mélanges entre du matériel d'origine jurassienne et d'origine alpine (ARN & CAMPY, 1990). Une poche de moraine alpine décarbonatée (« moraine cristalline ») et composée uniquement de fragments de roches silicatées est observée au site BAL 6A. Des dépôts fluvio-glaciaires, appartenant au complexe fluvio-glaciaire de Ballens (FIORE, 2007), sont présents dans le profil CHX, à 1 m de profondeur. Pour finir, un dépôt superficiel (*cover-bed*) recouvre l'ensemble de la toposéquence depuis le site BAL 3 jusqu'en bas. Le *cover-bed*, mis en place par des processus de solifluxion et/ou de ruissellement en environnement périglaciaire, est alimenté par les sédiments antérieurement déposés sur le versant. En conséquence, la composition du *cover-bed* évolue le long de la pente, en fonction des dépôts autochtones, loessiques ou morainiques rencontrés. En haut du versant (site BAL 3), le dépôt superficiel mesure environ 25 cm d'épaisseur et est principalement composé de matériel fin issu des loess et des produits d'altération des calcaires, contenant quelques rares cryoclastes calcaires. En bas de versant, le *cover-bed* devient légèrement plus épais (environ 30 cm) et inclut une fraction grossière plus importante (fragments calcaires et silicatés) fournie par les moraines mixtes et cristallines.

### Relations entre les formations superficielles de Ballens

Le pôle constitué par la roche calcaire représente la contribution du matériau autochtone (figure 4.23). Les calcaires du Kimmeridgien et du Portlandien sont composés de plus de 80 % de calcite, ce qui influence fortement la composition géochimique, dominée par le calcium (§ 4.2.3.). Les bancs de calcaire dur subissent une altération physique (fragmentation, cryoclastie, action des racines, etc.) et/ou chimique, formant respectivement des fragments de roche et du matériel fin résiduel. Une plus grande fragmentation des calcaires induit une augmentation de la surface de contact des fragments de roche, ce qui a pour conséquence d'augmenter le potentiel d'altération chimique. La calcite est progressivement dissoute et les ions carbonates et calcium sont libérés dans la solution du sol. La perte de ces ions par lixiviation provoque une baisse de leur concentration dans le matériel résiduel. Les deux autres pôles constitués respectivement de la moraine cristalline (profil BAL 6A) et des loess d'origine alpine (échantillons du Mont Tendre) sont des dépôts allochtones. Leurs signatures minéralogique et géochimique sont similaires, étant donné que les loess sont originaires des moraines alpines du Plateau suisse, et montrent une dominance des minéraux silicatés ainsi que des éléments silicium, aluminium, potassium, manganèse, fer et titane. Cependant, les sédiments éoliens se distinguent des moraines alpines par leur texture. En effet, le transport éolien agit comme un agent de tri sur les particules et les loess sont exclusivement composés de fractions fines limoneuses et/ou sableuses (PYE, 1987), alors que les moraines sont constituées de particules non triées de tailles hétérométriques (fractions fines, graviers, pierres et blocs). En conséquence, les deux types de dépôts réagiront différemment face aux processus d'altération et de pédogenèse. Les apports éoliens peuvent provenir de sources de déflation distinctes, ayant des compositions différentes. La contribution des moraines du Plateau suisse est attestée (POCHON, 1973, 1978). En revanche, il est probable que des moraines proximales mixtes situées au pied sud du Jura aient également contribué à la formation de loess locaux (hypothèse explicitée au § 6.1.2.). Les dépôts morainiques forment quant à eux un continuum le long du versant, se distribuant entre les dépôts alpins entièrement silicatés et jurassiens carbonatés. Finalement, les *cover-beds* sont définis par

leur position stratigraphique (dépôts de surface) et leurs dynamiques de mise en place (processus de versant, solifluxion), et non par une composition minéralogique ou géochimique spécifique. En effet, ils sont alimentés par les sédiments sous-jacents pendant leur transport et leur composition évolue le long de la pente. Dans certains profils, le *cover-bed* montre une discontinuité lithologique nette avec le matériau sous-jacent, alors que dans d'autres profils la transition est graduelle et la limite demeure difficile à établir.

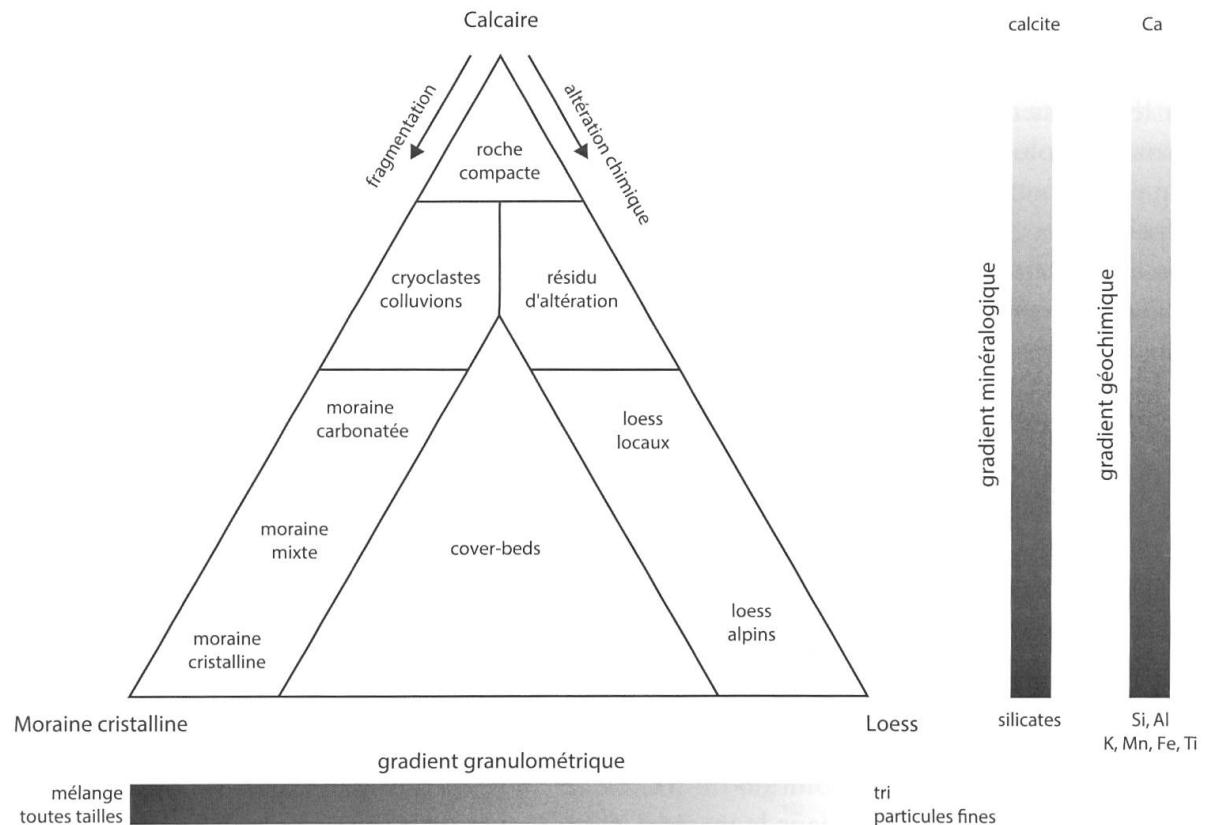


Figure 4.23. Diagramme ternaire représentant les relations existantes entre les différentes formations superficielles identifiées sur le site de Ballens. Les sédiments se distribuent en fonction de trois pôles représentés par les matériaux de référence (*end-members*) : la roche calcaire, la moraine alpine et les dépôts de loess d'origine alpine.