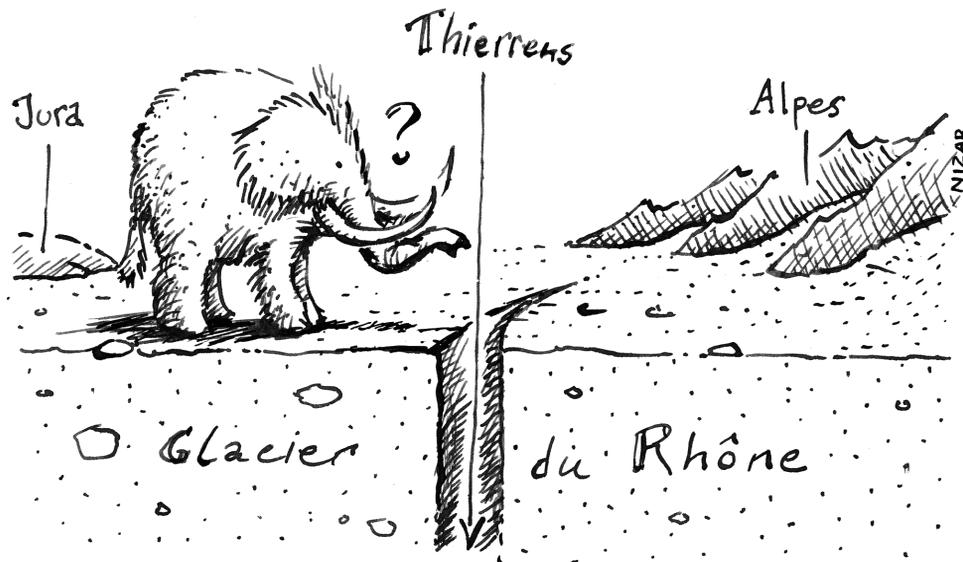


Étude géologique et pédologique de la région de Thierrens et réalisation d'un sentier didactique



Master en géologie par
Baptiste Grivel



Résumé

Le terrain de cette étude est une forêt de la région de Thierrens (massif forestier de la Commounaille). Le travail qui y a été effectué est composé de trois parties : une analyse granulométrique, chimique et minéralogique des sols, une étude des blocs erratiques et la création d'un sentier didactique. Les deux premières parties ont permis pour vérifier certaines informations contenues dans les panneaux du sentier didactique, notamment l'autochtonie de la couverture pédologique, formée par l'altération de la molasse gréseuse et de la moraine würmienne, une fois que le glacier du Rhône se fut retiré, et l'origine alpine des blocs erratiques rencontrés dans la région.

L'analyse pédologique a montré que les sols formés sur moraine et ceux formés sur molasse gréseuse sont chimiquement et minéralogiquement très identiques. La moraine étant composée de la molasse remaniée et de galets alpins, il paraît plausible que ce soit la composante molassique de la moraine, plus altérable que la composante alpine, qui ait le plus participé à la pédogenèse. L'analyse des éléments en traces montre toutefois que certains éléments, comme Ti, Zr et Ba, sont enrichis dans les sols formés sur moraine alors que les sols formés sur molasse sont enrichis en Fe, Cr et Ni. Il semble donc que, par l'analyse des éléments en traces, il soit possible de mettre en évidence une influence morainique sur la chimie des sols.

L'étude des blocs erratiques a permis, sur la base de comparaisons pétrographiques avec la littérature, de faire une hypothèse sur l'origine de deux faciès de granites échantillonnés dans la région de Thierrens. Le premier est un granite hyperalumineux à biotite et muscovite et semble être un morceau de granite de Vallorcine. Il trouve donc son origine dans le massif des Aiguilles Rouges. Le deuxième est un granite à biotite verte et allanite. Il est supposé être un morceau de granite du Mont-Blanc. Cette hypothèse a été confirmée par l'analyse typologique des zircons. Les résultats obtenus sur un morceau de bloc erratique échantillonné à Thierrens sont très semblables à ceux trouvés dans la littérature sur le granite du Mont-Blanc.

Un sentier didactique traitant de la géologie de Thierrens a été réalisé à la demande de l'association du Bois des Brigands. Cette association s'occupe de gérer le massif forestier de la Commounaille qui a été rebaptisé « Bois des Brigands ». Deux sentiers didactiques, sur les thèmes de la forêt, des fourmis et des animaux de la région, y avaient déjà été aménagés. Selon les vœux du comité du Bois des Brigands, les panneaux créés dans le cadre de cette étude sont destinés aux enfants et leur rédaction a demandé un réel travail de vulgarisation dans le but de rendre une information complexe agréable et facile à lire. Les panneaux, au nombre de dix-neuf, racontent, au fil du sentier, l'histoire géologique de la région, de la naissance des Alpes à la formation du sol.

Remerciements

La réalisation de ce travail, la partie scientifique tout comme la partie vulgarisation, a été rendu possible grâce l'aide de nombreuses personnes. Je les remercie ici chaleureusement.

Je remercie le professeur Tosten Vennemann, directeur de ce travail de Master, pour son agréable collaboration, ses conseils et sa confiance.

Je remercie tout particulièrement Nikola Zaric pour son amitié, sa disponibilité et son travail extraordinaire. Notre collaboration pour la réalisation du sentier didactique fut pour moi une aventure passionnante.

Je remercie chaleureusement le Dr. Micha Schlup, le professeur Michel Marthaler, ainsi que Lenka Kozlik de l'Institut de géographie de l'université de Lausanne (IGUL), pour avoir relu les textes de mes panneaux et pour leurs conseils plus que constructifs.

Mes remerciements vont également Marcel Vulliens, Alexandre Bula et Marcel Giger, du comité de l'association du Bois des Brigands, pour leur confiance en mon travail et pour leurs compliments.

Je remercie le professeur Hans-Ruedi Pfeifer, directeur du Centre d'Analyse Minérale de l'université de Lausanne, pour ses conseils et ses commentaires. Ma reconnaissance va également à toute l'équipe du CAM, notamment Jean-Claude Lavanchy pour ses conseils et sa gentillesse ainsi que Sylvain Coudret pour sa disponibilité.

Je remercie grandement le Dr. François Bussy pour son aide et ses idées dans la partie sur les blocs erratiques. Je remercie Pierre Vonlanthen pour ses explications sur l'utilisation du MEB.

Je remercie le Dr. Philippe Thélin et Liliane Dufresne du laboratoire de diffraction X pour leur travail.

Je tiens à remercier Laurent Nicod pour la confection des lames minces. Je remercie également Anne-Marie Chagros et Pariza Benyamina du secrétariat de géologie et Pascale Dalla Piazza, adjointe à la coordination de l'Ecole Lémanique des Sciences de la Terre et de l'Environnement (ELSTE), pour leur grande gentillesse et leur disponibilité. Je remercie Catherine Schlegel Rey, responsable de la bibliothèque des Sciences de la Terre, pour sa patience et sa disponibilité.

Je remercie mes collègues de bureau, Alexandre, Mélanie, Thibaud, Marc et Pierrick pour leur amitié, leurs conseils, leur expérience. Du fond du cœur, je remercie mes collègues de classe, Battista, Jérôme, Virginie, Pierrick, Dario, Sophie, Alain, Emmanuel, Aurélie, Éric, Clément, Andres, Giona, Minh, David, Myriam et Melissa, qui ont fait de ces études cinq années de bonheur.

Je remercie évidemment mes parents, Yves et Doris. Ma gratitude va tout spécialement à mes deux colocataires, mon frère Guillaume et Mathieu et leurs deux amies, Mélanie et Ségolène, pour ces cinq années inoubliables. Je les remercie pour leur affection, leurs présences agréables et la chaleur fraternelle qui a habité continuellement notre appartement.

Je remercie Virginie pour sa complicité, sa bonne humeur, sa tendresse.

Table des matières

1	<i>Introduction</i>	1
1.1	But du travail	1
1.2	Principaux travaux antérieurs utilisés	1
1.3	La région de Thierrens, situation géographique	2
2	<i>Géologie et pédologie de Thierrens</i>	3
2.1	Histoire géologique du Plateau	3
2.2	Les différentes lithologies	5
2.2.1	Molasse burdigalienne	6
2.2.2	Dépôts quaternaires	6
2.3	Géomorphologie	7
2.3.1	Les buttes orientées	7
2.3.2	Le cas de la Commounaille	9
2.4	Notion de sol	9
2.5	Processus de la pédogenèse sous climat tempéré	10
2.5.1	Brunification	10
2.5.2	Décarbonatation	11
2.5.3	Évolution de sols bruns	11
2.6	Les sols de la région de Thierrens	11
2.6.1	Les roches mères	11
2.6.2	Les sols de Thierrens	13
3	<i>Protocole d'échantillonnage et méthodes d'analyses</i>	14
3.1	Prélèvement des sols	14
3.2	Prélèvement des roches erratiques	14
3.3	Analyses des sols	15
3.3.1	Analyse granulométrique	15
3.3.2	Granulométrie par diffraction laser	16
3.3.3	Analyses Chimiques (XRF)	17
3.3.4	Analyses minéralogiques (XRD)	19
3.4	Caractérisation des roches	19
3.4.1	Analyse de lames minces au microscope optique	19
3.4.2	Typologie des zircons	20
4	<i>Étude des sols : relation roche mère – sol</i>	21
4.1	But	21
4.2	Description physique des profils	22
4.3	Classification	23

4.4	Granulométrie	24
4.4.1	Conclusion sur les descriptions physiques et l'étude granulométrique	27
4.5	Chimie (XRF)	28
4.5.1	Éléments majeurs	28
4.5.2	Conclusions sur les éléments majeurs	33
4.5.3	Éléments en traces	34
4.5.4	Conclusions sur l'analyse des éléments en traces	40
4.6	Minéralogie (XRD)	41
4.7	Conclusions finales sur les sols	42
5	<i>Étude des blocs erratiques</i>	44
5.1	Données préexistantes	44
5.2	Différentes lithologies rencontrées dans le cadre de ce travail	45
5.3	Les granites	46
5.3.1	Granite de Vallorcine	46
5.3.2	Granite du Mont-Blanc	48
5.4	Conclusions finales sur les blocs erratiques	54
6	<i>Conclusions de la partie scientifique et perspectives</i>	55
6.1	Étude des sols	55
6.2	Études des blocs erratiques	55
7	<i>Création d'un sentier didactique</i>	57
7.1	Introduction	57
7.2	Création d'un sentier didactique à Thierrens	58
7.2.1	Nature du travail	58
7.2.2	Les particularités du lieu	58
7.2.3	De quoi parler ?	59
7.2.4	Structure des panneaux	62
	<i>Bibliographie</i>	64
	<i>Annexes</i>	
A.	Carte géologique, extrait de la feuille d'Yverdon-les-Bains	
B.	Profil S17	
C.	Profil S12	
D.	Analyses XRF	
E.	XRD, diffractogrammes	
F.	XRD, estimation des pourcentages en minéraux majeurs	
G.	Localisation des échantillons	
H.	Paysage de l'USM. Reconstitution due à Oswald Heer, 1864	
J.	Panneaux didactiques. À la découverte de l'histoire de la Terre	

Table des illustrations

Chapitre 1

- Figure 1.1 : Carte schématique de l'ouest de la Suisse avec la position de Thierrens par rapport à Lausanne (L) et Yverdon-les-Bains (Y), et carte topographique qui situe le massif forestier de la Commounaille par rapport à Thierrens (colline allongée à environ 1 km au sud de Thierrens). La carte topographique vient de swisstopo 2005 (Office fédéral de topographie). _____ 2

Chapitre 2

- Figure 2.1 : L'épaisseur de la glace lors de l'optimum würmien. Profil schématique à travers le Moyen Pays vaudois (modifié d'après BADOUX 1995). _____ 4
- Figure 2.2 : Nature des substrats géologiques du Plateau vaudois (tiré de GRATIER et BARDET 1980). _____ 5
- Figure 2.3 : Tableau schématique des molasses successives (modifié d'après WEIDMANN 1987). _____ 5
- Figure 2.4 : Nature des buttes orientées selon BERSIER (1942). Il s'agit de cuestas émoussées (tiré de BERSIER 1942). _____ 8
- Figure 2.5 : Buttes orientées dans la région de Thierrens. Les collines entourées d'un cercle rouge (notamment la colline de la Commounaille) sont, d'après JORDI (1995), de vrais drumlins. La butte orientée entourée d'un cercle noir présente un noyau molassique, comme le prouve la présence d'un affleurement. Il ne s'agit donc pas, dans ce cas, d'un véritable drumlin (extrait de l'Atlas géologique de la Suisse 1:25'000 ; © OFEG-Berne/Swisstopo-Wabern GA-PK2511). _____ 8
- Figure 2.6 : Coupe dans les dépôts morainiques à Bettens. On remarque bien la complexité des dépôts morainiques. Le sol peut donc avoir une charge en cailloux, ou une texture très variable sur de petites distances latéralement (d'après GRATIER et BARDET 1980). _____ 12
- Figure 2.7 : Structure géologique et répartition des sols. Sur le Jorat se développent préférentiellement des sols bruns acides. P = précipitation annuelle moyenne, D = drainage climatique annuel = P – ETP (tiré de GRATIER et BARDET 1980). _____ 13

Chapitre 3

- Figure 3.1 : Bloc de gneiss œillé clairement « en place ». Ce bloc est caractérisé par un diamètre d'environ un mètre et se trouve dans une zone difficilement accessible. Un morceau de ce bloc a été échantillonné (BDB-18). _____ 15

Chapitre 4

- Figure 4.1 : Situation des profils analysés (points oranges). L'échantillon de molasse gréseuse BDB-25 est représenté par le point bleu (extrait de l'Atlas géologique de la Suisse 1:25'000 ; © OFEG-Berne/Swisstopo-Wabern GA-PK2511). _____ 21
- Figure 4.2 : Profil S17 et S12. Voir annexes B et C pour avoir les images en plus grand format. _____ 23
- Figure 4.3 : Courbes granulométriques cumulées des horizons du profil S17. Les échantillons ont été tamisés à 200 μm , et la matière organique a été détruite avec de l' H_2O_2 . OMM correspond à l'échantillon BDB-25, molasse gréseuse saine, mais décarbonatée à l' HCl . _____ 25
- Figure 4.4 : Courbes granulométriques cumulées des horizons du profil S12. _____ 25
- Figure 4.5 : Pourcentages du profil S17 en éléments majeurs, exprimés sous forme d'oxydes, en % poids. Ce graphique met en comparaison les teneurs des horizons de sol et les teneurs de la roche mère saine (BDB-25). Les résultats ont été obtenus par XRF, et l'erreur standard est plus

petite que le symbole. Les pourcentages ont été recalculés sans le LOI (perte au feu). La droite représente une fonction $1 : 1$.	29
Figure 4.6 : Comportement de Ca et Sr le long du profil S17. L'horizon R, correspond à l'échantillon BDB-25. L'erreur n'a pas été reportée sur ce graphique, car elle est nettement plus petite que la différence de teneurs entre l'horizon C et de l'horizon R.	30
Figure 4.7 : Teneurs en Fe_2O_3 , MgO et K_2O le long du profil S17. Les valeurs sont exprimées en pour cent poids d'oxydes. Les barres horizontales représentent l'erreur standard.	30
Figure 4.8: Pourcentages du profil S17 en éléments majeurs, exprimés sous forme d'oxydes. Ce graphique met en comparaison les teneurs des horizons de sol et la roche mère saine (BDB-25), dont les teneurs ont été recalculées pour que CaO corresponde aux teneurs dans les horizons de sol.	31
Figure 4.9 : Pourcentages du profil S12 en éléments majeurs, exprimés sous forme d'oxydes. L'horizon le plus profond ($B_{(2)}$) a été mis en abscisse et sert d'horizon de référence dans la comparaison avec les horizons supérieurs. Les valeurs sont exprimées en % poids.	32
Figure 4.10 : Teneurs en Fe_2O_3 , MgO et K_2O , le long du profil S12. L'unité est en % poids.	32
Figure 4.11 : Comparaison entre les horizon B des profil S17 et S12. La taille des rectangles rouges correspond à l'erreur standard.	33
Figure 4.12 : Ba vs K_2O . Le baryum est exprimé en ppm et K_2O en pour cent poids. Les étoiles bleues correspondent aux horizons du profil S17 et l'étoile rouge correspond à la molasse gréseuse (OMM) échantillonnée proche du profil S17 (échantillon BDB-25). Les symboles ronds correspondent aux profils de sol échantillonnés au sein du massif forestier de la Commounaille.	36
Figure 4.13 : Ni vs Fe^t . Le fer est exprimé sous forme élémentaire et correspond à la concentration de fer total.	36
Figure 4.14 : Cr vs Fe^t .	37
Figure 4.15 : Pb vs Cr.	37
Figure 4.16 : Zr vs Fe^t .	38
Figure 4.17 : Zr vs TiO_2 .	38
Tableau 4.1 : Classes granulométriques utilisées.	24
Tableau 4.2 : Teneurs en % poids pour les différentes fractions du profil S17. R correspond à l'échantillon BDB-25.	26
Tableau 4.3 : Teneurs en % poids pour les différentes fractions du profil S12.	27
Tableau 4.4 : Estimation en pour cent poids pour les minéraux majeurs du profil S17. L'erreur sur chaque valeur est de $\pm 4\%$. R correspond aux valeurs obtenues pour l'échantillon BDB-25. R* représente les mêmes valeurs mais recalculée à 100% en éliminant la calcite.	41
Tableau 4.5 : Estimation en pour cent poids pour les minéraux majeurs du profil S12. L'erreur sur chaque valeur est de $\pm 4\%$.	42

Chapitre 5

Figure 5.1 : Échantillons BDB-3.	47
Figure 5.2 : Échantillon BDB-15.	49
Figure 5.3 : Principaux types et sous-types de la classification typologique des zircons (tiré de PUPIN 1980).	51
Figure 5.4: a) Projection cristallographique des principales faces des cristaux de zircons naturels (PUPIN 1976). b) Principaux types rencontrés dans l'échantillon BDB-15. Ils sont tous composés d'une pyramide $\{101\}$ et de deux prismes $\{100\}$ et $\{110\}$. Le type P_5 est le plus représenté. Il est caractérisé par un prisme $\{100\}$ nettement plus prononcé que $\{110\}$ (modifié d'après PUPIN 1976).	51

Figure 5.5 : a) Classification typologique des zircons selon PUPIN (1976 et 1980). Les données sur le faciès central et le faciès de bordure du granite du Mont-Blanc ont été tirées de BUSSY (1990). b) Champs de répartition des indices typologiques moyens (I.A. et I.T.) des principaux ensembles granitiques (PUPIN 1988). Les points moyens de l'échantillon de roche erratique de Thierrens et des deux faciès du granite du Mont-Blanc ont été reportés sur ce graphique. _____ 52

Figure 5.6 : Principales formes de zircons rencontrées dans l'échantillon BDB-15. Images obtenues grâce au microscope électronique à balayage. a) type P₅, les faces {100} sont nettement plus larges que les faces {110}. b) à gauche, type P₅, à droite type P₄. Les faces {110} sont à peu près deux fois moins larges que les faces 100. c) type P₃, les faces {100} et {110} sont d'égale largeur. d) type P₁, les faces {110} sont nettement plus larges que les faces {100}. e) autre type P₁. f) on voit peut-être l'apparition de pyramides {211}. On a donc ici un minéral de type S₂₅. ____ 53

Tableau 5.1 : Lithologies rencontrées dans la région de Thierrens. _____ 46

Chapitre 7

Figure 7.1 : Structure d'un panneau. _____ 63

1 Introduction

1.1 But du travail

Le but premier de ce travail aura été de créer un parcours didactique destiné à expliquer la géologie de la région de Thierrens aux enfants. Le travail a été mandaté par l'association du Bois des Brigands qui s'occupe de gérer le massif forestier de la Commounaille (au sud de Thierrens). L'association a pour but de sensibiliser les promeneurs, et plus spécialement les enfants, à la nature qui les entoure. Le bois est donc un lieu de jeu et de détente. Deux sentiers didactiques ont déjà été réalisés sur les thèmes des arbres, des fourmis et des animaux de la région. Ce travail a pour dessein de réaliser un troisième sentier sur le thème de la géologie. Selon les termes des membres du comité de l'association du Bois des Brigands, les sentiers sont destinés aux enfants et ont notamment pour but de susciter des vocations. Un des enjeux principal sera donc de capter le lecteur, de l'amener à lire les panneaux et lui donner l'envie d'aller lire le suivant.

Pour baser ce travail sur certains faits scientifiques, une étude de divers aspects géologiques de la région a été réalisée. Une étude des roches erratiques trouvées dans la région a été effectuée, ainsi qu'une analyse chimique et minéralogique des sols.

1.2 Principaux travaux antérieurs utilisés

Thierrens ainsi que le massif forestier de la Commounaille se trouvent sur la feuille d'Yverdon-les-Bains de l'Atlas géologique de la Suisse au 1 : 25'000. La carte géologique et la notice explicative ont été réalisées par JORDI (1994). La région étudiée se trouve à l'extrémité sud-est de la carte, il peut, de ce fait, être également nécessaire de consulter les cartes géologiques adjacentes, c'est-à-dire les feuilles d'Échallens, de Romont et de Moudon, respectivement réalisées par BERSIER (1952), WEIDMANN et al. (1995) et GABUS et al. (2000).

PARRIAUX (1970) a réalisé son diplôme de géologie et de géophysique sur les régions de Thierrens et de Bercher. Ce travail donne un bon aperçu des lithologies de la région et donne également quelques clés concernant l'interprétation géomorphologique. Concernant la géomorphologie à proprement parler, le travail de AUBERT (1981) sur la géomorphologie du Gros-de-Vaud est un ouvrage indispensable. À propos de la géologie glaciaire du plateau, l'ouvrage de BADOUX (1995) donne un excellent aperçu sur les phénomènes liés au glacier du Rhône au Pléistocène. En ce qui concerne la pédologie, la monographie de GRATIER et BARDET (1980) est une bonne introduction sur la formation des sols du plateau vaudois. La carte écologique et physiographique des sols du canton de Vaud, réalisée par HAEBERLI (1971), fournit également de précieuses informations sur les sols de la région de Thierrens. Concernant

l'analyse des sols, un ouvrage fût indispensable à ce travail. Il s'agit du travail de Thèse de Romano DALLA PIAZZA (1996) sur la géochimie des altérations en milieu tempéré. Il y décrit notamment, de façon détaillée, les phénomènes d'altération et de pédogenèse sur molasse gréseuse burdigalienne, à Lutry, un contexte très similaire à Thierrens.

En ce qui concerne la partie vulgarisation de ce travail, plusieurs ouvrages sont à citer. Premièrement, *La petite géologie Lausannoise* de Marc WEIDMANN (1987) fût une profonde source d'inspiration et d'informations. *Le Cervin est-il africain ?* de Michel MARTHALER (2005) a également été d'une grande utilité à la réalisation des panneaux didactiques, tant par son intelligence pédagogique, que par sa capacité à synthétiser l'information.

1.3 La région de Thierrens, situation géographique

Situé dans le massif du Jorat, à 5 km à vol d'oiseau au nord-ouest de Moudon, Thierrens appartient au district du Gros-de-Vaud. Le Bois des Brigands (massif forestier de la Commounaille) se situe à 1 km au sud de Thierrens. Il se présente sous la forme d'une colline allongée dans le sens SW-NE et son altitude maximale de 852 m fait de lui un des points culminants de la région. Le massif jouit ainsi, en terrain dégagé, de la vue sur les Alpes au sud et sur le Jura au nord. Les coordonnées GPS sont les suivantes : (547.8/171.5).

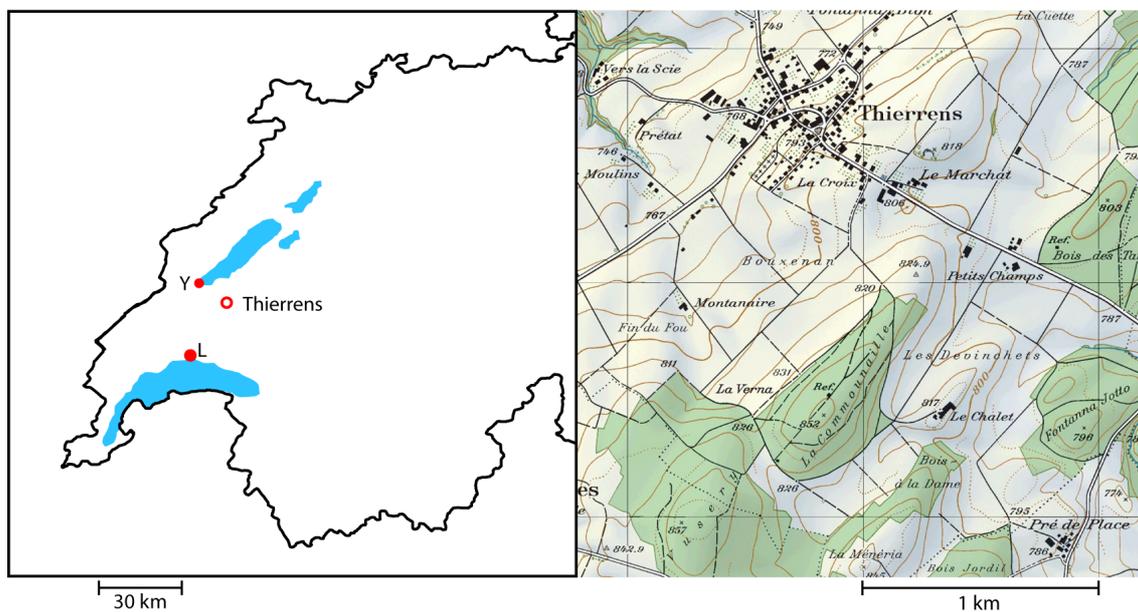


Figure 1.1 : Carte schématique de l'ouest de la Suisse avec la position de Thierrens par rapport à Lausanne (L) et Yverdon-les-Bains (Y), et carte topographique qui situe le massif forestier de la Commounaille par rapport à Thierrens (colline allongée à environ 1 km au sud de Thierrens). La carte topographique vient de swisstopo 2005 (Office fédéral de topographie).

2 Géologie et pédologie de Thierrens

Dans ce chapitre seront décrites les principales unités géologiques et pédologiques de la région, leur histoire et leur genèse.

2.1 Histoire géologique du Plateau

Ce chapitre présente de façon détaillée l'histoire du Plateau molassique suisse. C'est également cette histoire qui aura servi de base à la rédaction des panneaux didactiques.

La roche affleurante dans la région de Thierrens est la molasse marine supérieure (OMM, Obere Meeresmolasse), déposée au Tertiaire dans une mer qui s'étendait au nord des Alpes. Cette mer, appelée Paratéthys, était reliée à la Téthys en divers points, notamment par le bassin du Rhône et le Plateau suisse. L'histoire géologique du Plateau suisse commence toutefois bien avant cette période molassique.

Au Jurassique et au Crétacé se déposent, dans la Téthys, les sédiments calcaires qui constituent les Préalpes et le Jura. Dans la région du Plateau suisse, la mer se retire à la fin de l'ère secondaire. Les roches calcaires sont alors mises à l'émersion sous un climat tropical. Cette époque est enregistrée par les poches de sidérolitique datant de l'Eocène (50 à 35 Ma). Il s'agit de poches karstiques, creusées par dissolution dans les calcaires du Crétacé, puis remplies par des remaniements de sols rouges latéritiques qui se développent à la surface.

À partir de l'Oligocène (34 Ma), commence la succession des différentes molasses, composées principalement de conglomérats, de grès et de marnes. Ces sédiments proviennent de l'érosion des reliefs alpins et se déposent dans un bassin au front des Alpes en cours de formation. Le bassin molassique s'étend alors de Marseille à Vienne. Son existence incombe à la flexure de la plaque européenne qui subducte sous la plaque adriatique. Il en résulte également la géométrie dissymétrique du bassin, nettement plus profond dans sa partie sud, au front des Alpes (environ 4000 m de dépôts), que dans sa partie nord, où se situe actuellement le Jura (quelques dizaines de mètres).

L'histoire molassique est caractérisée par une succession de paysages marins et continentaux. Elle commence donc au début de l'Oligocène, au Rupélien (34 Ma), avec la molasse marine inférieure (UMM). La mer envahit à nouveau les terrains où s'étaient jusqu'alors produits l'érosion karstique et la formation des sols latéritiques. Dans cette mer se déposent sables et argiles. Au Chattien (28 Ma), dû à une baisse mondiale du niveau des océans (WEIDMANN 1987), cette première mer molassique se retire. On passe au dépôt de la molasse d'eau douce inférieure (USM). Le Plateau abrite alors une plaine d'inondation traversée par de grandes rivières et où s'étendent de vastes lacs. Les sédiments qui se déposent sont donc de nature lacustre et fluviatile. Les sédiments fluviatiles présentent des faciès différenciés, en fonction de la vitesse de courant des rivières et de la distance par rapport à la source. Ainsi, au sortir des vallées alpines se

forment des cônes d'alluvions constitués de sable et de galets. Aujourd'hui, les poudingues ou conglomérats du Mont-Pèlerin en sont les témoins. Plus loin dans la plaine, se déposent principalement des sables. Plus loin encore, ne restent plus que les particules les plus légères, les sables fins et les limons (constituant aujourd'hui les marnes). Il résulte ainsi une grande diversité de texture au sein de l'USM. Cette sédimentation se poursuit jusqu'à la fin de l'Aquitaniien (20 Ma). Au Burdigalien (dès 20 Ma) la mer transgresse à nouveau sur le bassin molassique, tant par l'est (Bavière), que par l'ouest (actuelle vallée du Rhône) (BERGER 1985). C'est le passage à la molasse marine supérieure (OMM). Cette mer sera la dernière mer molassique. Elle est caractérisée par une faible profondeur, une salinité proche de la normale, un climat tempéré à subtropical (BERGER 1985). La molasse burdigalienne est constituée essentiellement de faciès gréseux. L'Helvétien (16 Ma) est marqué le passage à la molasse d'eau douce supérieure (OSM). Les dépôts, fluviaux et lacustres, de cette époque ne sont pas visibles sur le Plateau vaudois, effacés par l'érosion. Les affleurements les plus proches se trouvent dans la région de la vallée de l'Aar, au sud de Berne (WEIDMANN 1987). Sur le Plateau vaudois, on ne trouve aucun dépôt datant du Miocène supérieur, du Pliocène, ou du Quaternaire antérieur au Riss (BADOUX 1995). Ceci est dû à d'importants mouvements tectoniques qui affectèrent l'orogénèse alpine il y a 5 millions d'années. L'avant-pays alpin, Jura et Plateau molassique, est plissé et soulevé, avec pour cause une intense érosion de la molasse (WEIDMANN 1987).

L'histoire continue avec le Quaternaire (1.8 Ma), caractérisé par une alternance de périodes glaciaires et de stades interglaciaires. Les deux grandes périodes glaciaires sont celles du Riss et du Würm. La glaciation du Riss s'est étendue de 250'000 à 160'000 BP, celle du Würm de 125'000 à 19'000 BP. Le maximum d'extension des glaces eut lieu entre 25'000 et 20'000 BP (BADOUX 1995). À cette époque, le glacier du Rhône occupe le Plateau suisse. Il s'étend à l'est et loin à l'ouest, jusque dans la région de Lyon. Sa bordure ouest se situe alors à 20 km à l'est de Lyon et sa bordure est stationne dans la région de Wangen, à 10 km à l'est de Soleure. La couche de glace au-dessus du Jorat est d'une épaisseur d'environ 500 m (BADOUX 1995, voir figure 2.1).

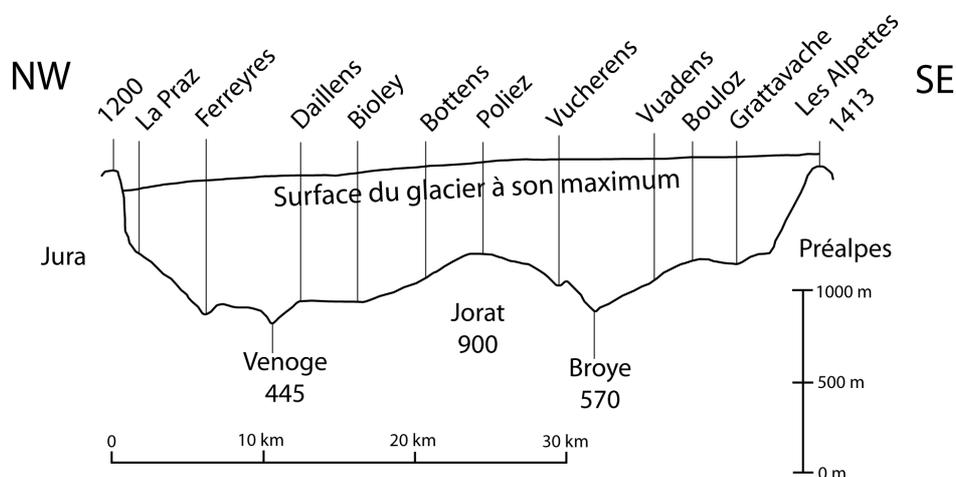


Figure 2.1 : L'épaisseur de la glace lors de l'optimum würmien. Profil schématique à travers le Moyen Pays vaudois (modifié d'après BADOUX 1995).

À partir de 19'000 BP, le glacier régresse. Il y a 13'210 ans BP, il dépose la moraine latérale de Dorigny, dans la région de Lausanne (WEIDMANN 1987). Ainsi, à cette époque, la région de Thierrens est déjà déglacée et le sol commence à se former. D'après WEIDMANN (1987) le climat froid de type toundra que connaît la région, directement après le retrait du glacier, passe dès -13'000 ans BP à un climat plus chaud et sec ayant pour conséquence la densification de la forêt et l'apparition des espèces thermophiles, telles que le hêtre et le chêne dès -10'000 ans BP.

2.2 Les différentes lithologies

Le Jorat est constitué des couches tabulaires de la molasse marine burdigalienne qui chapeautent la molasse d'eau douce de l'Aquitanien. Le Jorat est limité au Sud par le chevauchement de la molasse subalpine qui met en contact la molasse du Burdigalien et la molasse du Stampien (figure 2.2 et 2.3).

Au Pléistocène, les glaciers envahissent plusieurs fois la région. Le Plateau est ainsi uniformément recouvert de moraine.

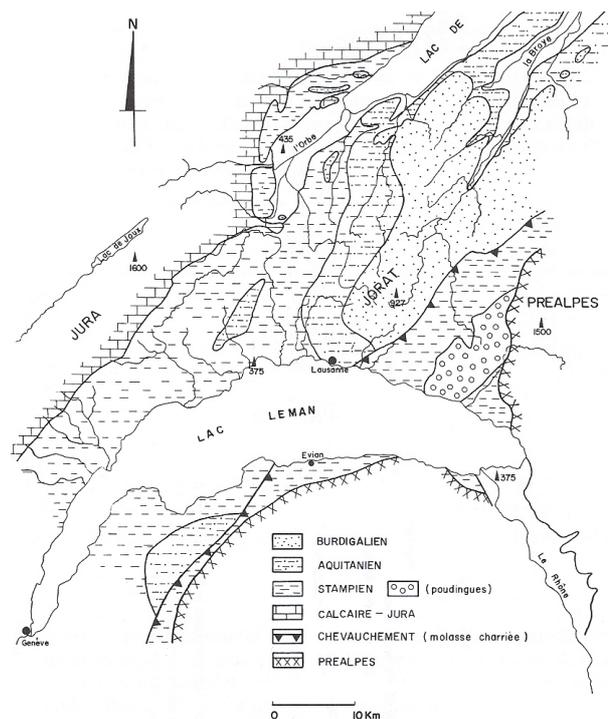


Figure 2.2 : Nature des substrats géologiques du Plateau vaudois (tiré de GRATIER et BARDET 1980).

Ma	Époques	Étages	Molasses successives		
11	Miocène	mo.	Helvétien	Molasse d'eau douce supérieure : <i>graviers fluviatiles, marnes et calcaires lacustres</i>	OSM
16		inf.	Burdigalien	Molasse marine supérieure : <i>sables marins</i>	OMM
20			Aquitanien	Molasse d'eau douce inférieure : <i>conglomérats, sables fluviatiles, marnes et calcaires lacustres</i>	USM
24	Oligo-cène		Chattien		
34			Stampien	Molasse marine inférieure : <i>sables de plages</i>	UMM

Figure 2.3 : Tableau schématique des molasses successives (modifié d'après WEIDMANN 1987).

2.2.1 Molasse burdigalienne

La molasse burdigalienne est composée principalement de grès marins quartzo-feldspathiques à ciment calcaire et de *grès coquilliers*. Les grès marins ont une teinte qui varie du gris clair au gris verdâtre. Dans la région de Thierrens, ce sont principalement les bancs des grès coquilliers qui affleurent, à cause de leur plus grande dureté relative. Cette lithologie marque la fin de la série des grès marins du burdigalien, en ce qui concerne la feuille d'Yverdon-les-Bains (JORDI 1995).

L'échantillon BDB-25 a été récolté à 1 km au sud-est de la Commounaille. L'affleurement est constitué de grès fins gris-beige, indurés mais très friables. L'échantillon récolté ne permettait pas de faire de lames minces, cependant, des analyses XRD (voir chapitre 3) ont été réalisées et ont donné les estimations suivantes :

BDB-25 : 30% quartz, 8% feldspaths potassiques, 12% plagioclases, 40% calcite, 10% phyllosilicates.

Des lames minces ont été effectuées à partir de deux autres échantillons récoltés dans les alentours de Thierrens :

BDB-5 et BDB-6 : Le ciment sparitique compose environ 40% de la roche. Le pourcentage de quartz varie entre 20 et 30%, celui des feldspaths entre 10 et 15%. Ces éléments sont anguleux à sub-anguleux, généralement peu sphériques. La taille moyenne des grains se situe autour 0,5 mm. La glauconie est présente dans tous les échantillons, à raison de 2 à 3%, sous forme de grains très arrondis d'environ 0,3 mm. La muscovite est également présente, à raison de moins de 1%. On peut trouver jusqu'à 5% de bioclastes et jusqu'à 12% de lithoclastes magmatiques ou micritiques. Le tri et l'arrondi des grains, ainsi que la faible teneur en matrice argileuse nous permet de classer ces échantillons dans les arénites arkosiques.

WEIDMANN (1996) décrit les Grès coquilliers comme grès toujours grossiers et contenant entre 30 et 70% de tests de lamellibranches plus ou moins fragmentés, de fréquents galets exotiques et jusqu'à 5% de glauconie. Une lame mince effectuée sur un bloc erratique de grès coquillier trouvé dans la forêt de la Commounaille a permis de confirmer ces détails (échantillon BDB-2, voir chapitre 5 sur les blocs erratiques).

2.2.2 Dépôts quaternaires

JORDI (1995) souligne que « à l'est de la plaine de l'Orbe, le Plateau molassique est uniformément recouvert d'une moraine de fond argilo-silteuse très typique, relativement peu épaisse, qui contient surtout du matériel molassique remanié ainsi que des galets alpins ».

D'après la carte géologique de JORDI (1994) (c.f. annexe A), la région étudiée, au sud de Thierrens, est également recouverte de manière uniforme de moraine rhodanienne. Certaines zones ont été cartographiées sous l'appellation *molasse sous mince couverture morainique*. C'est le cas par exemple des alentours de la colline de Vusery. Cette appellation désigne les zones où l'épaisseur de moraine est inférieure à 2

m. Toutefois, JORDI (1995) souligne que cette distinction avec les zones où la moraine est plus épaisse est difficile à faire et parfois arbitraire. JORDI (1995) considère la colline de la Commounaille, ainsi que les quelques autres collines de forme ovale allongée qui se situent au sud-est de Thierrens, comme de vrais drumlins, faits de moraine de fond. Les points suivants (3.3.1 et 3.3.2) s'épanchent plus longuement sur la nature de ces buttes orientées.

La moraine qui recouvre notre région est cartographiée sous le terme *moraine rhodanienne*, dont le symbole est q_{4m} . Ce terme comprend différents faciès dont la *moraine de fond* et la *moraine graveleuse*. La moraine de fond est une argile silteuse compactée, à blocs et galets striés, de teinte gris-bleu à l'état frais et gris-jaunâtre lorsqu'elle est altérée. La moraine graveleuse, également appelée moraine superficielle, moraine caillouteuse de retrait ou moraine d'ablation est composée de sables et graviers limoneux à gros blocs. Cette moraine s'est, en premier lieu, déposée sur le glacier puis a été abandonnée sur place lors du retrait glaciaire. D'après GRATIER et BARDET (1980), les cailloux y sont nombreux et peu émoussés. Toutes les classes granulométriques sont représentées. Ce faciès se superpose généralement à la moraine de fond.

2.3 Géomorphologie

2.3.1 Les buttes orientées

La région de Thierrens est constituée de couches tabulaires de grès burdigaliens. Le pendage des couches est donc généralement faible, il varie entre 0 et 10°, et s'oriente dans des directions très diverses. Ceci est caractéristique de la stratification entrecroisée des grès burdigaliens. Les affleurements sont rares et sont généralement constitués de grès coquilliers, en raison de leur plus grande dureté relative.

Au sud de Thierrens, on trouve une série de buttes orientées, dont fait partie la colline de la Commounaille. Elles sont de forme ovoïde, allongées dans la direction SW-NE. On trouve de telles buttes orientées sur tout le Plateau suisse. Leur nature est sujette à des interprétations diverses, le manque d'affleurement ne permettant souvent pas de trancher entre le véritable drumlin et la butte molassique. Par définition, un drumlin est une colline composée de moraine de fond et allongée dans le sens de l'écoulement du glacier. Mais ce dernier trait morphologique ne suffit pas à reconnaître un véritable drumlin, car l'érosion glaciaire et la formation des drumlins se font les deux dans le sens de l'écoulement du glacier (BERSIER 1942).

BERSIER (1942) considère que la morphologie de ces alignements topographiques est purement rocheuse et d'origine structurale. D'après lui, ces buttes orientées ne sont pas des drumlins : « Dans la genèse de ces alignements topographiques, l'alluvionnement morainique drumlinique n'a aucune part. Il n'y a pas de champs de drumlins sur le Plateau vaudois entre la Venoge et les Préalpes. Cette morphologie de côtes et de buttes ou croupes est essentiellement rocheuse ». Le glacier se serait borné à

émousser, moutonner et empâter de moraine un relief molassique monoclinale préexistant. Pour BERSIER, le glacier n'a donc pas non plus creusé de façon différentielle la molasse pour en dégager les collines molassiques. Les buttes seraient des cuestas préexistantes que le glacier aurait simplement émoussé et empâté de moraine.

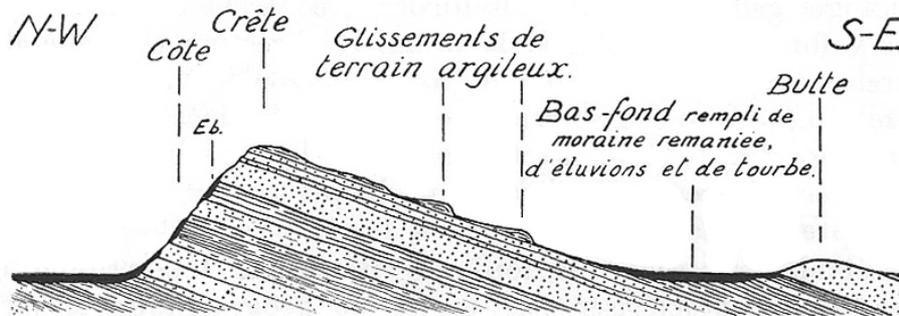


Figure 2.4 : Nature des buttes orientées selon BERSIER (1942). Il s'agit de cuestas émoussées (tiré de BERSIER 1942).

Dans la région de Thierrens, il me semble que l'on ne peut pas se montrer aussi péremptoire. En effet, dans cette région, les couches de molasse ne sont pas monoclinales, mais bien tabulaires. Ce paysage de cuestas n'y est pas approprié. Il n'en incombe toutefois pas une nature totalement drumlinique de ces collines. Pour exemple, la colline à l'est de Thierrens (Figure 2.5) allongée SW-NE présente un cœur de Grès coquillier, et montre ainsi que bien que toujours empâtées de moraine, ces buttes orientées peuvent présenter un cœur rocheux.

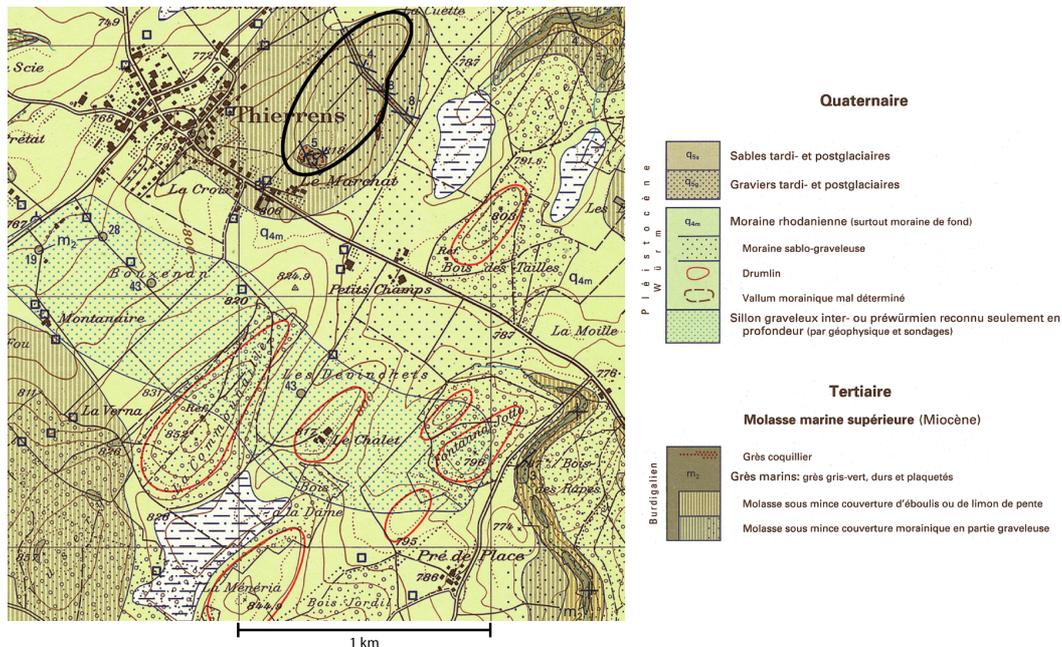


Figure 2.5 : Buttes orientées dans la région de Thierrens. Les collines entourées d'un cercle rouge (notamment la colline de la Commounaille) sont, d'après JORDI (1995), de vrais drumlins. La butte orientée entourée d'un cercle noir présente un noyau molassique, comme le prouve la présence d'un affleurement. Il ne s'agit donc pas, dans ce cas, d'un véritable drumlin (extrait de l'Atlas géologique de la Suisse 1:25'000 ; © OFEG-Berne/Swisstopo-Wabern GA-PK2511).

En ce qui concerne notre région, je me rattache donc à l'avis de AUBERT (1981) qui s'écarte de la conception quasi antiglacialiste de BERSIER et propose un rôle du glacier plus important, tout en n'oubliant pas que *le glacier ne s'est pas avancé sur une surface uniforme, mais il en a modifié le relief et imprimé au paysage un cachet particulier* (AUBERT 1981). Dans le cas des buttes orientées de Thierrens, AUBERT (1981), ne voit qu'un agent d'érosion possible, capable d'avoir taillé ces collines dans un Plateau tabulaire mal drainé : le glacier. D'après lui le glacier est donc tout à fait capable de creuser la roche de façon différentielle et ainsi d'en dégager les couches dures.

Ceci ne résout toutefois pas le problème des drumlins. Il est impossible de distinguer le véritable drumlin constitué uniquement de moraine d'une colline au cœur molassique empâtée de moraine. Il est donc probable, comme le propose BADOUX (1995), que l'on puisse rencontrer tous les termes de passage entre le drumlin, la butte à noyau molassique empâtée de moraine et la butte entièrement molassique.

2.3.2 Le cas de la Commounaille

Dans le cadre de son travail de diplôme, PARRIAUX (1970) a cartographié la colline de la Commounaille comme molasse sous faible couverture morainique. Il propose donc que la colline est de nature molassique, mais recouverte de moraine. Dans la notice explicative de la carte géologique de Yverdon-les-Bains, JORDI (1995) considère quant à lui, la colline de la Commounaille, ainsi que les autres collines de forme ovale situées au sud-est de Thierrens, comme de vrais drumlins faits de moraine de fond. Un forage effectué proche de la Commounaille (548.25/171.62) a traversé 7,5 m de moraine de fond. Le drumlin de la Commounaille s'élevant 40 m au-dessus de la cote d'implantation du forage, JORDI (1995), considère que la colline comprend 47 m de matériel morainique.

Mes propres observations sur le massif de la Commounaille, démontrent clairement l'importance de la moraine. La présence de blocs erratiques alpins, ainsi que l'ubiquité de matériel morainique plus fin, galets et graviers, que l'on retrouve en grande quantité dans le sol, ne laisse pas de doute. Toutefois, cela n'exclut en aucun cas la possibilité d'un noyau rocheux. Ainsi, nous utiliserons dans la suite de ce travail le terme neutre de « colline » de la Commounaille.

2.4 Notion de sol

Dans leur ouvrage de 1980, *les sols du Plateau vaudois*, GRATIER et BARDET donnent une très bonne définition du sol. La voici, citée sans modifications :

« Le sol est une mince pellicule qui se forme à la surface de la terre et dans laquelle les végétaux trouvent l'eau et les éléments minéraux nécessaires à leur croissance. Formé à la surface de contact de la lithosphère et de l'atmosphère, le sol est le produit résultant de l'interaction des facteurs climatiques, géologiques et de la végétation. C'est une masse essentiellement minérale, plus ou moins finement divisée à laquelle se

mélange de la matière organique dans la partie supérieure. Le sol est également peuplé d'une foule d'organismes vivants, animaux ou végétaux, micro ou macroscopiques. Leur existence conditionne l'évolution ou la conservation des sols, l'équilibre nutritionnel des végétaux.

La formation et l'évolution d'un sol conduisent à la différenciation verticale de divers niveaux que l'on appelle horizons. L'ensemble des horizons s'appelle profil. Schématiquement, on désignera par « A » l'horizon de surface riche en matière organique. « B » est l'horizon intérimaire, qui peut se composer essentiellement de matières minérales, provenant de l'altération de la roche, ou bien s'enrichir des produits entraînés de la surface vers la profondeur par le lessivage (argiles, éléments solubles). Enfin, l'horizon « C » désigne le matériau originel dont le sol est issu.

L'évolution normale d'un sol est de type C – AC – A(B)C – ABC. Cependant, il n'est pas rare que les processus d'évolution d'un sol soient empêchés pour des raisons diverses (géographiques, climatiques, topographiques). C'est la raison pour laquelle on rencontre des sols dont le degré d'évolution est très variable. »

2.5 Processus de la pédogenèse sous climat tempéré

Dans les pays tempérés, les deux processus les plus importants sont la décarbonatation, si la roche mère est carbonatée, et la brunification. Ces deux processus mènent à la formation de sols bruns, sols dominants sur le Plateau vaudois (GRATIER et BARDET 1980).

2.5.1 Brunification

Le Fe^{2+} qui provient des minéraux altérés est oxydé en Fe^{3+} au contact de l'atmosphère. Le brunissement du sol est dû, d'une part, à la cristallisation de goethite (FeOOH) et, d'autre part, à l'association de fer amorphe et de matière organique aux argiles. Les différents horizons des sols bruns sont généralement peu différenciés et présentent des transitions graduelles.

La solubilité du fer ferrique (Fe^{3+}) est très faible, et la quantité de Fe^{3+} dans la solution du sol ne devient notable que lorsque le pH descend nettement en dessous de 6. C'est alors que le fer peut se fixer aux argiles. Ainsi, sur roches calcaires ou carbonatées, la décarbonatation précède toujours la brunification (LEGROS 2007).

La brunification correspond donc à la formation de l'horizon d'altération B. Cet horizon va s'épaissir en même temps que le front de décarbonatation descend. L'horizon B est caractérisé par une structure polyédrique (GRATIER et BARDET 1980).

2.5.2 Décarbonatation

La décarbonatation peut également être appelée hydrolyse des carbonates. Il s'agit de la dissolution du calcaire par les acides organiques provenant de la litière et de l'acide carbonique contenu dans l'eau de pluie. Le calcium est entraîné en profondeur sous forme de ions de bicarbonate, très solubles. Sur le Plateau molassique, toutes les roches mères sont carbonatées avec une proportion moyenne de 25 % de calcaire (GRATIER et BARDET 1980).

2.5.3 Évolution de sols bruns

Sur substratum carbonaté, le premier stade est celui de *sol brun calcaire*. Intervient alors la décarbonatation du sol. On passe au stade de *sol brun calcique*, riche encore en bases, c'est-à-dire Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ . On parle alors de *sol brun eutrophe*. Au fur et à mesure que ces cations, très solubles, sont éliminés, ils sont remplacés par des ions H^+ . Il en résulte un abaissement du pH et le passage au stade mésotrophe, puis oligotrophe caractérisé par un pH est acide (< 5). On parle alors de *sol brun acide*. À ce stade peut suivre celui de sol lessivé, caractérisé par l'entraînement des argiles en profondeur.

2.6 Les sols de la région de Thierrens

2.6.1 Les roches mères

Comme nous l'avons vu plus haut, nous sommes en contexte de molasse gréseuse recouverte assez uniformément de moraine. Les roches mères potentielles dans la région étudiée sont donc : molasse gréseuse, moraine peu épaisse sur molasse gréseuse, ou moraine épaisse (drumlin).

- **Molasse gréseuse**

L'étude de lames minces et une analyse XRD sur des échantillons de la molasse provenant de la région étudiée ont confirmé qu'il s'agissait d'un grès feldspathique à ciment calcaire (cf. chapitre 2.2.1). Le pourcentage de calcaire est d'environ 40%, mais il peut atteindre 70 % dans le faciès coquilliers. Le pourcentage de quartz varie entre 20 et 30 % et les feldspaths entre 10 et 20 %. La taille des grains se situe autour de 0,4 mm. Les XRD ont révélé environ 10 % de phyllosilicates dans l'échantillon BDB-25.

• Couverture morainique

Ce terme est peu précis et englobe une série de faciès distincts. Dans notre cas, les deux faciès que l'on risque de rencontrer sont les suivants :

- La moraine de fond, déposée sous le glacier. Elle est de nature argilo-silteuse et contient surtout du matériel molassique remanié ainsi que des galets alpins striés (JORDI 1995). Elle est le produit du rabotage de la molasse par le glacier, auquel s'ajoute une part de matériel alpin. D'après GRATIER et BARDET (1980), la composition texturale de la moraine reflète celle de la molasse sous-jacente. Toujours d'après les mêmes auteurs, la proportion de carbonates présente un maximum de fréquence à 25 %.
- La moraine superficielle ou moraine d'ablation, déposée sur le glacier puis abandonnée sur place lors de son retrait. Les cailloux et blocs sont nombreux et peu émoussés. Toutes les classes granulométriques sont représentées. Ce faciès se superpose généralement à la moraine de fond. L'enchevêtrement entre les différents faciès morainiques peut être très complexe (voir figure 2.6).

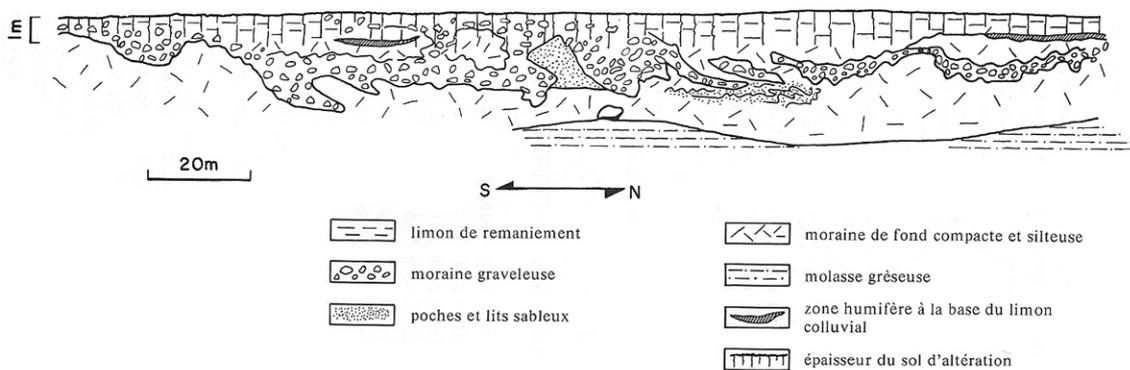


Figure 2.6 : Coupe dans les dépôts morainiques à Bettens. On remarque bien la complexité des dépôts morainiques. Le sol peut donc avoir une charge en cailloux, ou une texture très variable sur de petites distances latéralement (d'après GRATIER et BARDET 1980).

Dans la région étudiée, la principale interrogation concerne la nature de la colline de la Commounaille. Ce point a déjà été développé au chapitre 2.3. Les observations effectuées sur le terrain ne permettent pas de trancher. Les roches récoltées au sein du massif forestier présentent des tailles allant du gravier au bloc erratique. Les cailloux sont généralement peu émoussés, parfois même anguleux et ne semble pas présenter de stries. Ceci laisse supposer que la colline de la Commounaille est composée en tout cas d'une couche de moraine d'ablation. Il est vraisemblable qu'une certaine épaisseur de moraine de fond soit sous-jacente à la moraine d'ablation. S'il existe encore un cœur molassique, cela reste invérifiable. Toutefois, il semble vraisemblable que la pédogenèse au sein du massif de la Commounaille soit surtout influencée par un

matériel de nature morainique carbonaté. Les analyses granulométriques, chimiques et minéralogiques permettront d'en dire d'avantage.

2.6.2 Les sols de Thierrens

Les sols les plus représentés sur le Plateau sont les sols bruns ou *Braunerde*. GRATIER et BARDET (1980) ont observé qu'en forêt dans le massif du Jorat, au dessus de 700 m et sur molasse gréseuse et mélange moraino-molassique se développent des sols bruns acides (figure 2.7).

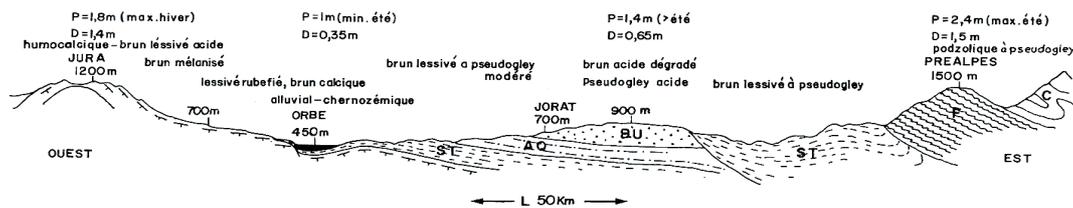


Figure 2.7 : Structure géologique et répartition des sols. Sur le Jorat se développent préférentiellement des sols bruns acides. P = précipitation annuelle moyenne, D = drainage climatique annuel = P – ETP (tiré de GRATIER et BARDET 1980).

En 1971, HAEBERLI a publié une carte écologique et physiographique des sols du canton de Vaud. Il écrit, dans la notice, que les sols de la région de Thierrens sont des *cambisols-luvisols*. Il se réfère ici à la classification proposée par la FAO (1968). Le terme « cambisol » remplace le terme de sol brun et « luvisol » celui de sol brun lessivé. Les termes de sol brun et sol brun lessivé font partie de l'ancienne classification française CPCS de 1967 (Commission de Pédologie et de Cartographie des sols) et de la classification suisse qu'utilisent GRATIER et BARDET (1980).

Le profil de sol sur molasse burdigalienne que DALLA PIAZZA (1995) a étudié à Lutry est un alocrisol-redoxisol selon le Référentiel Pédologique (BAIZE et GIRARD 1995). Cela correspond à un sol brun acide selon CPCS (1967) et à un dystric cambisol selon FAO (1982).

3 Protocole d'échantillonnage et méthodes d'analyses

3.1 Prélèvement des sols

Lorsque les modalités du terrain permettaient de le faire facilement, une fosse a été creusée pour l'échantillonnage. Cette méthode a l'avantage de peu perturber l'organisation verticale et horizontale du sol et de permettre une meilleure distinction visuelle des différents horizons. Toutefois, la méthode qui a été plus généralement utilisée est le carottage à la tarière. Cette technique a l'avantage d'être relativement rapide et d'être utilisable en quasiment toute situation.

En utilisant une tarière, « les échantillons sont modérément perturbés verticalement (respect des successions verticales à 1 ou 2 cm près), mais déformés et mélangés horizontalement » (BAIZE et JABIOL 1995). En plus des perturbations horizontales engendrées, divers inconvénients surviennent à l'usage de la tarière. Premièrement, la taille de l'outil utilisé limite la profondeur de sondage possible. Dans notre cas, la profondeur maximale de sondage est atteinte à 1,20 m. Deuxièmement, lors d'abondance d'élément grossier (moraine), il peut devenir difficile d'enfoncer la tarière. Néanmoins, de nombreuses observations peuvent être effectuées : texture, couleur, effervescence à l'HCl 10%. Et l'échantillonnage en vue d'analyses chimiques et minéralogiques est également possible.

Chaque horizon, au sein d'un même profil, a été échantillonné. Dans un premier temps, la distinction des différents horizons s'est faite en se basant sur des critères directement identifiables, tels que la couleur et la texture. D'après BAIZE et JABIOL (1995), la couleur sert effectivement dans un premier temps à distinguer les différents horizons : « La couleur n'est pas un caractère trompeur : chaque modification est significative d'un changement dans les proportions d'un ou plusieurs constituants, ou bien d'un changement de leur état ». Parfois, plusieurs échantillons ont été récoltés au sein d'un même horizon, à différentes profondeurs. Globalement, trois à cinq échantillons ont été récoltés par profil de sol.

Latéralement, le choix des sites de carottage s'est fait principalement en fonction de la lithologie sous-jacente, supposée (informations fournies par la carte géologique) ou évidente (roche mère clairement identifiable). Un profil de référence (profil S17), développé sur molasse gréseuse burdigalienne, a été échantillonné. Le reste des profils a été échantillonné au sein et aux alentours du massif de la Commounaille, sur substratum morainique (c.f figure 4.1 et 4.2 et annexes B et C).

3.2 Prélèvement des roches erratiques

Je parle ici de roches erratiques, car ont été échantillonnés, tant de véritables blocs erratiques (diamètre de plus de 20 cm), que des galets de taille suffisante pour en permettre l'identification ou pour en faire une lame mince (diamètre supérieur à 5 cm).

Il peut paraître contradictoire de parler de blocs erratiques « en place ». Toutefois, c'est la condition principale que devait remplir les roches échantillonnées. Par « en place », j'entends des blocs ou galets déposés dans la région par le glacier würmien et non importés ou déplacés par l'homme. Seules les roches qui semblaient clairement en place ont été échantillonnées. Ce sont généralement des blocs de grande taille (un mètre de diamètre et plus) se trouvant dans des zones difficilement accessibles, au sein de la forêt (voir figure 3.1), ou des galets ramassés dans les racines d'une souche renversée. Finalement, la meilleure méthode consiste à se poser la question suivante : quelle aurait été la raison d'amener un tel bloc ici ? Souvent la réponse apparaît rapidement claire. Il faut par exemple éviter les abords des chemins forestiers, souvent empierrés avec du tout venant.

Toute la surface du massif forestier de la Commounaille a été parcourue et échantillonnée, ainsi que les alentours du mont Vusery.



Figure 3.1 : Bloc de gneiss ceillé clairement « en place ». Ce bloc est caractérisé par un diamètre d'environ un mètre et se trouve dans une zone difficilement accessible. Un morceau de ce bloc a été échantillonné (BDB-18).

3.3 Analyses des sols

3.3.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée sur deux profils. Le premier est le profil de référence S17 (c.f. annexe B) et le deuxième est un profil qui se trouve au sein du massif de la Commounaille (profil S12, c.f. annexe C). Pour le profil S17, un échantillon de molasse gréseuse, considérée comme roche mère, a été analysé (échantillon BDB-25).

L'étude granulométrique a été utilisée pour vérifier l'homogénéité verticale au sein des profils, pour vérifier la filiation entre la roche mère et le sol, ainsi que pour déterminer une évolution granulométrique au cours de l'altération.

- **Traitements préalables**

- a. Les échantillons de sols sont traités au H₂O₂ dans le but d'éliminer la matière organique et de détruire les agrégats. On ajoute 100 ml de H₂O₂ 10% à 10 g d'échantillon de sol (tamisé à 2 mm). Le mélange est porté à ébullition plusieurs fois, jusqu'à la fin de la réaction. Pour s'assurer de la destruction complète de la matière organique, on peut rajouter, par petites portions, 10 ml de H₂O₂ 35%.
- b. L'échantillon de molasse utilisé pour l'analyse granulométrique a préalablement été traité au HCl 2M. Le but est de détruire le ciment calcaire de la roche. Ce traitement est justifié, car les sols de la région étudiés ne présentaient pas de réaction au HCl (à part pour un profil), même en profondeur. Cela montre que la décarbonatation par les acides organiques de la litière et l'acide carbonique est déjà avancée. Pour comparer les courbes granulométriques des différents horizons du sol (décarbonatés) avec la roche mère (molasse gréseuse), il est donc justifié d'en détruire le ciment calcaire.

3.3.2 *Granulométrie par diffraction laser*

Le principe de la méthode est basé sur la diffraction de la lumière par les particules. L'angle et l'intensité de la diffraction varient en fonction de la taille des particules (théorie de Fraunhofer). Plus la particule est petite, plus l'angle de diffraction est grand et l'intensité faible. En connaissant la figure de diffraction d'un ensemble de particules (intensité lumineuse des différents angles de diffraction), il sera possible de calculer la distribution granulométrique des particules.

L'appareil de granulométrie laser utilisé est Fritsch Particle Sizer « analysette 22 ». Pratiquement, il s'agit de mettre une petite quantité du matériel à analyser (petite pointe de couteau) dans le réservoir rempli d'eau de la machine. Un agitateur sonore permet de détruire les agrégats. L'appareil fait ensuite passer l'échantillon au travers d'un laser.

- **Limites de la méthode**

L'appareil de granulométrie laser utilisé ne permet pas de mesurer les particules de taille supérieure à 300 µm. Nous nous situons ici à peu près à la limite entre les sables fins et sables grossiers. Cette limite se situe à 200 µm. Il s'agit donc de tamiser les échantillons à 200 µm, d'analyser la granulométrie de la fraction inférieure à 200 µm à l'aide de l'appareil de granulométrie laser et d'estimer le pourcentage des fractions supérieures par pesée.

Les résultats obtenus pour les fractions inférieures à 200 µm sont cohérents. Si on prend l'exemple du profil S17 (c.f. figure 4.3), la superposition des courbes granulométriques cumulées montre un trajet granulométrique qui correspond à une

évolution par fragmentation physique (LEGROS, 1982, cité par DALLA PIAZZA, 1996). La plupart des sols en climat tempéré suivent cette évolution granulométrique.

Les résultats obtenus par granulométrie laser sont exprimés en pourcentage de volume. On obtient donc le pourcentage du volume total de matériel que contient chaque classe granulométrique. Les fractions supérieures à 200 μm ont été pesées et les résultats sont exprimés en pourcentage de poids. Si l'on part de l'hypothèse que la masse volumique de chaque particule est identique (ce qui semble raisonnable), les résultats obtenus par granulométrie laser seraient directement comparables avec ceux obtenus par pesée. En effet, si l'on multiplie les pourcentages de volume de chaque classe granulométrique par une masse volumique identique, dans le but d'obtenir des résultats en pour cent poids, et que l'on normalise à nouveau les résultats à 100 %, la multiplication par la masse volumique est annulée. Ainsi, si la masse volumique de chaque particule est identique, une fois normalisés à 100 %, les résultats en pour cent poids sont identiques aux pour cent volume.

Toutefois, les courbes obtenues par la compilation des données de la granulométrie laser et celles de la pesée donnent des résultats suspects. Dans le souci de comparer des données comparables, j'ai trouvé judicieux de ne comparer entre elles que les courbes granulométriques obtenues grâce à l'appareil laser, toutes acquises de la même manière. Les valeurs en pour cent poids obtenues pour les fractions supérieures à 200 μm devront être analysées séparément.

3.3.3 Analyses Chimiques (XRF)

- **Préparation des échantillons**

Les analyses chimiques et minéralogiques se font sur ce qu'on appelle la terre fine, c'est-à-dire la fraction du sol inférieure à 2 mm. Les échantillons sont donc préalablement tamisés à 2 mm. Ils sont ensuite broyés à l'aide d'un broyeur à disques oscillants en carbure de tungstène. On obtient ainsi une poudre fine, employée pour la confection des pastilles qui serviront à l'analyse chimique, par fluorescence des rayons X (XRF). La même poudre peut être utilisée pour l'analyse minéralogique, par diffraction des rayons X (XRD).

Pour l'analyse XRF, deux types de pastilles peuvent être utilisés. Les pastilles pressées sont utilisées principalement pour l'analyse des éléments en traces et les pastilles fondues sont utilisées pour obtenir une meilleure précision sur les éléments majeurs. Les pastilles pressées présentent également l'avantage d'être assez rapides à la fabrication. C'est la méthode utilisée dans ce travail.

- **Fonctionnement de la méthode**

La méthode XRF permet d'investiguer les éléments chimiques présents dans un échantillon. Il n'est toutefois pas possible d'analyser les éléments dont le numéro atomique est inférieur à 9, c'est-à-dire les éléments plus légers que le fluor. Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de haute énergie. La longueur d'onde du rayonnement se situe entre 0.2 et 20Å.

Lorsqu'un échantillon est bombardé avec un rayonnement X primaire, chaque élément va émettre un rayonnement secondaire (ou fluorescent) avec une longueur d'onde caractéristique de sa nature. Ce spectre est formé de la façon suivante : lorsque les électrons d'un élément sont excités (dans ce cas par un rayonnement X primaire), certains électrons des couches inférieures (basse énergie) peuvent être éjectés de la structure électronique. Un rayon X secondaire est émis, dû au remplacement de l'électron arraché par un électron venant d'une couche de niveau supérieur. Il existe plusieurs possibilités pour le remplacement de l'électron arraché. Il peut venir d'une couche K, L ou M, générant dans chaque cas un rayonnement X d'intensité spécifique. La longueur d'onde des rayons X secondaires est caractéristique de l'élément dont il est issu et son intensité est proportionnelle à sa teneur dans l'échantillon

- **Génération des rayons X**

Les rayons X sont créés dans un tube à rayons X, grâce à une forte tension mise entre une anode et une cathode. Un électron est arraché à la cathode et est envoyé sur l'anode, formée de Rhodium (Rh). L'électron arraché vient frapper l'électron d'un atome de Rh. L'électron arraché à l'atome est remplacé par un électron venant d'une couche de niveau supérieur. Ce transfert est accompagné par l'émission d'un rayon X ayant une longueur d'onde spécifique au Rh. Le rayon X produit est focalisé à l'aide d'un collimateur sur l'échantillon.

- **Détection du rayon X secondaire**

Les rayons X secondaires sont envoyés sur un cristal connu qui va permettre de les disperser en fonction de leurs longueurs d'onde, selon la loi de Bragg (voir chapitre 3.3.4 sur les XRD). Il sera ainsi possible, connaissant l'angle avec lequel le cristal a diffracté le rayon X, de déterminer sa longueur d'onde et donc l'élément qui est à la base de l'émission du rayon X. Un goniomètre permet de déplacer le détecteur sur un cercle et ainsi de repérer chaque longueur d'onde. L'intensité des rayons X (mesurée en coups par minute) permet de déterminer la teneur de l'élément dans l'échantillon.

3.3.4 Analyses minéralogiques (XRD)

La diffraction des rayons X (XRD) permet de déterminer la composition minéralogique d'un échantillon. Elle utilise une fourchette de rayons X comprise entre 1.5 et 1.9Å, dits « rayons durs ». Généralement, on utilise un rayon de longueur d'onde $K\alpha_1$ du cuivre (1.5418 Å)

Cette méthode se base sur l'arrangement cristallin et la loi de Bragg. Un cristal se définit comme un solide constitué d'atomes disposés sur des plans équidistants. La distance d qui sépare les plans atomiques (distance interréticulaire) est propre à chaque minéral. En mesurant cette distance, il est donc possible d'identifier la nature du minéral.

Lorsque l'on bombarde un cristal avec un rayonnement dont la longueur d'onde est λ , les rayons X incidents sont réfléchis dans toutes les directions par les différents plans d'atomes de l'échantillon. Lorsque les rayons réfléchis par deux plans successifs du même minéral sont en phase, il se crée une interférence constructive. L'intensité des rayons X analysés par le collecteur est beaucoup plus forte et la diffraction est alors mesurable. L'angle pour lequel le minéral crée cette diffraction est donné par la loi de Bragg :

$$d = n \cdot \lambda / 2 \cdot \sin(\theta)$$

$n = [1; 2; 3; \dots]$ est le nombre de phases de décalage, λ la longueur d'onde, d l'espacement interréticulaire et θ l'angle d'incidence. On connaît la longueur d'onde du rayon incident λ , généralement de 1.5418 Å. Si l'on trouve l'angle θ , on peut calculer la distance interréticulaire d , propre au minéral.

Les résultats se présentent sous la forme d'un spectre appelé diffractogramme, graphique où l'intensité du rayonnement réfléchi est mise en fonction de l'angle de diffraction 2θ . À partir de l'intensité, il est possible de calculer le pourcentage des minéraux présents dans l'échantillon. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'il s'agit là d'une estimation. Dans notre cas, les résultats XRD sont donnés en pourcentage de poids, avec une précision de $\pm 4\%$.

3.4 Caractérisation des roches

3.4.1 Analyse de lames minces au microscope optique

Les lames étudiées sont d'une épaisseur de 30 μm . Elles permettent d'identifier, au microscope optique, les minéraux constituant la roche et d'estimer leurs proportions modales. Elles sont indispensables à la description pétrographique et donc à l'identification des roches erratiques échantillonnées dans la région étudiée. Des lames minces ont été confectionnées pour vingt-deux échantillons de roches erratiques. Deux

lames minces ont été confectionnées pour des échantillons de molasse pris sur affleurements.

3.4.2 Typologie des zircons

La méthode de la typologie des zircons, telle que décrite par PUPIN (1976), a été utilisée sur un échantillon, dans le dessein de certifier l'origine d'un bloc erratique de granite supposé être un granite du Mont-Blanc. Les résultats obtenus ont été ensuite comparés avec les données de la littérature (BUSSY 1990).

- **Extraction des zircons**

Il s'agit d'obtenir, à partir de l'échantillon de roche, un sable dont la taille des grains est inférieure à 250 μm . L'échantillon est d'abord concassé, dans ce cas-ci à l'aide d'une presse hydraulique. Ensuite, il est passé au broyeur à disques oscillants pendant dix secondes. Le matériel broyé est tamisé à 250 μm . S'il reste une fraction qui n'a pas passé le tamis à 250 μm , il est à nouveau passé au broyeur pendant dix secondes. Une fois cette étape effectuée, les minéraux lourds sont concentrés à l'aide d'une batée, en utilisant la technique de l'orpailleur. La batée permet d'exercer un mouvement de va-et-vient de l'eau sur le sable. Les particules légères de la couche supérieure sont emportées avec le courant, les particules lourdes restent et se concentrent dans la batée. Cet exercice est effectué jusqu'à ce qu'il ne reste qu'une petite quantité de sable. Un séparateur magnétique (Frantz[®] Magnetic Separator) est alors utilisé pour séparer les minéraux ferromagnétiques et paramagnétiques des minéraux diamagnétiques. Dans notre cas, les minéraux paramagnétiques sont les micas et les oxydes et les minéraux diamagnétiques sont le quartz, le zircon et quelques apatites. La technique du picking est ensuite utilisée pour sélectionner les cristaux de zircon.

- **Images au microscope électronique à balayage**

Les zircons sont recouverts d'or pour permettre la prise d'image au microscope électronique à balayage. Les images obtenues permettent une très bonne identification des prismes et des pyramides développés par le cristal.

4 Étude des sols : relation roche mère – sol

4.1 But

Le but est de vérifier la filiation entre la roche mère et les sols formés dans la région. Nous voulons donc vérifier le caractère in situ de l'altération et ainsi vérifier l'autochtonie de la couverture pédologique, formée après le retrait du glacier du Rhône. Comme il en a déjà été fait mention au chapitre 2.3, la nature de la colline de la Commounaille est controversée. Toutefois, il paraît évident qu'une partie superficielle de la colline est composée de moraine. Le but est donc également de tester quelle a pu être l'influence de la moraine sur la chimie, la minéralogie et la texture des sols, sachant que cette moraine est composée d'un mélange de molasse remaniée et de matériel alpin.

Un profil de sol sur molasse burdigalienne, situé à environ 1 km au sud-ouest de la Commounaille (profil S17, voir figure 4.1 et 4.2), a été choisi comme profil de référence, auquel seront comparés les profils échantillonnés au sein du massif de la Commounaille. La roche mère, sous-jacente au profil de référence a été échantillonnée (BDB-25) et analysée. Il s'agit d'un grès feldspathique à ciment calcaire. Les analyses XRD ont permis d'estimer les pourcentages des minéraux principaux : 30% de quartz, 8% de feldspaths potassiques, 12% de plagioclases, 40% de calcite et 10% de phyllosilicates (cf. point 2.2.1). Dans le cas des profils de sol de la Commounaille, la roche-mère n'a jamais été atteinte.

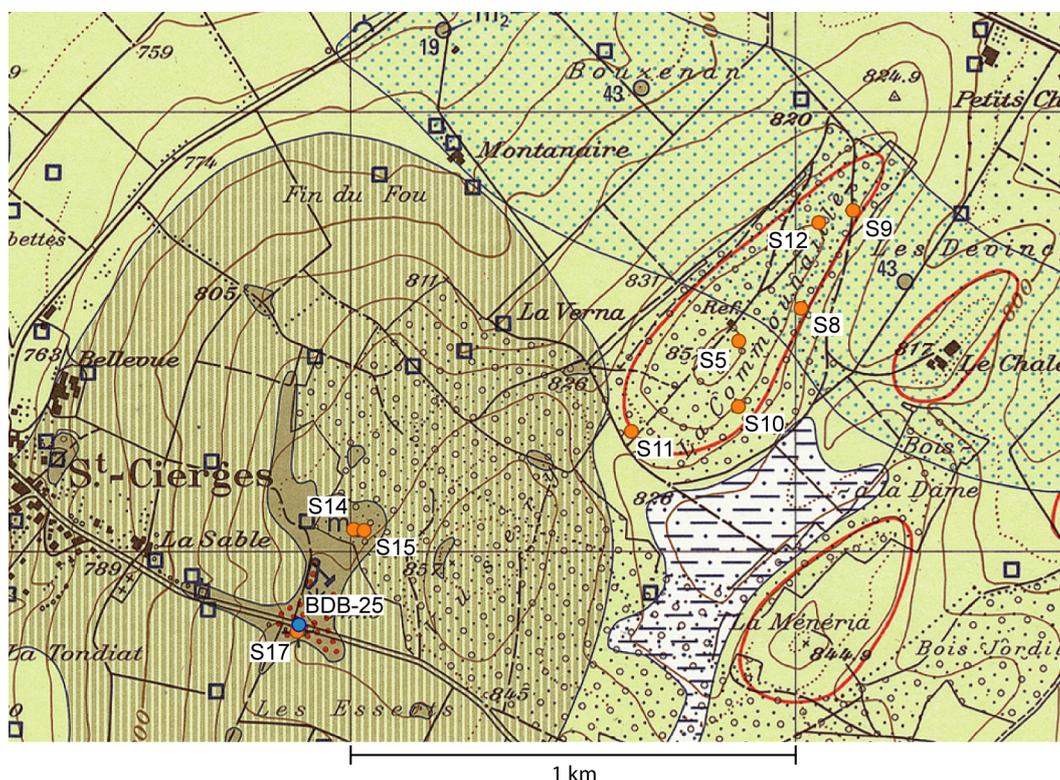


Figure 4.1 : Situation des profils analysés (points oranges). L'échantillon de molasse gréseuse BDB-25 est représenté par le point bleu (extrait de l'Atlas géologique de la Suisse 1:25'000 ; © OFEG-Berne/Swisstopo-Wabern GA-PK2511).

4.2 Description physique des profils

La dénomination des horizons qui a été utilisée est la suivante : A, horizon organo-minéral ; B, horizon essentiellement minéral ; C, roche mère altérée ; R, roche mère saine. S'il existe plusieurs horizons appartenant à la même domination au sein d'un profil, ils sont numérotés en indice (exemple : A₁ et A₂). Si, par contre, plusieurs échantillons ont été récoltés le long d'un même horizon, à des profondeurs différentes, ils seront numérotés entre parenthèses (exemple : B_{1(1)}} et B_{1(2)}}).

Deux profils sont décrits ici. Le profil S17, profil de référence développé sur molasse gréseuse et le profil S12 qui a été choisi pour représenter les profils développés sur la colline de la Commounaille. Le profil S12 sera également utilisé pour représenter les sols de la Commounaille dans l'analyse granulométrique et l'analyse des éléments majeurs.

a. Profil S17 : (c.f. figure 4.2 et annexe B)

Quatre horizons peuvent être distingués le long de ce profil. Les deux premiers sont riches en matière organique, comme en atteste leur couleur brun foncé. Ce sont des horizons A. La transition avec l'horizon B inférieur est diffuse. Cet horizon est caractérisé par une meilleure structuration. Sa couleur est plus beige. Une transition assez nette marque le passage à l'horizon inférieur. Ce dernier est caractérisé par une couleur gris-verdâtre très différente de celle des horizons supérieurs. La brunification n'a donc pas encore eu lieu dans cet horizon. Le teste à l'HCl a par contre montré qu'il a déjà subi la décarbonatation. Il s'agit donc de l'horizon C, horizon de roche mère altérée. Les caractéristiques de la molasse gréseuse sont bien reconnaissables. La profondeur du profil n'a pas permis d'atteindre la roche mère saine, mais un affleurement de molasse gréseuse saine proche du site de carottage a permis de prélever l'échantillon BDB-25. Il sera considéré comme étant l'horizon R, roche mère de ce profil.

Le pH, estimé à l'aide d'un colorimètre de terrain, indique clairement que le sol est acide tout le long du profil. Le pH se situe autour de 5. La texture est limono-sableuse avec une augmentation de la composante sableuse vers le bas du profil. L'épaisseur du sol, de la surface jusqu'au sommet de l'horizon C, est d'environ 70 cm.

b. Profil S12 : (c.f. figure 4.2 et annexe C)

On distingue trois horizons le long du profil. À nouveau, nous avons deux horizons de type A, caractérisés par une bonne teneur en matière organique. Il en résulte une couleur brune très foncée. Suit un horizon B, caractérisé par une bonne structure. La couleur est d'un beau brun et l'on remarque une gradation de l'intensité de la couleur vers le bas du profil. Le profil s'arrête à la profondeur où il n'était plus possible d'enfoncer la tarière. En contexte morainique, il est impossible de dire si l'on atteint la

roche mère ou si l'on s'est arrêté sur un bloc. Toutefois, il en résulte une épaisseur minimum de sol de 95 cm. À nouveau, le pH se situe autour de 5 dans tous les horizons. La texture est limoneuse à finement sableuse. Les observations de terrain indiquent une légère augmentation de la teneur en argiles vers le bas du profil.

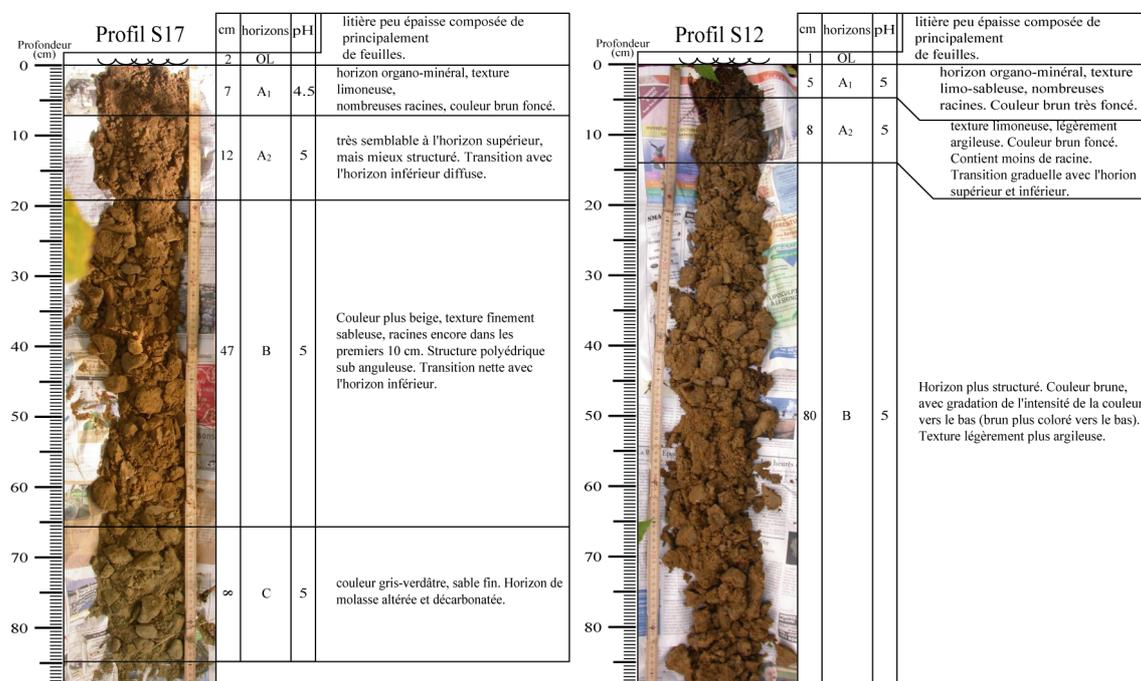


Figure 4.2 : Profil S17 et S12. Voir annexes B et C pour avoir les images en plus grand format.

4.3 Classification

Les caractéristiques des profils S12 et S17, permettent de les classer dans les *sols bruns*, vraisemblablement acides, en raison d'un pH globalement bas (autour de 5). En ce qui concerne la classification proposée par le Référentiel Pédologique (BAIZE et GIRARD 1995), nous pouvons les classer dans les *alocryols* ou les *brunisol*s. Les *alocryols* correspondent aux *sols bruns acides* de la classification CPCS, et les *brunisol*s aux *sols bruns*. La différence principale, entre les deux, se situe au niveau de l'aluminium échangeable (Al^{3+}), quasiment absent dans les *brunisol*s mais en concentration importante dans les *alocryols*. Il nous est donc impossible de choisir entre les deux termes, car nous ne connaissons pas le taux d'aluminium échangeable.

Les profils échantillonnés au sein de la Commounaille qui n'ont pas été décrits ici présentent des caractéristiques similaires au profil S12. Les données XRF et XRD les concernant se trouvent en annexe (c.f. annexes D, E et F). Le profil S9, caractérisé par des teneurs élevées en calcite et un pH entre 7 et 8, fait toutefois exception. Il s'agit ici d'un sol encore carbonaté. L'analyse des galets présents le long du profil 9 a montré que les roches carbonatées, calcaires et grès carbonatés, étaient nettement dominantes. Ceci n'est pas le cas pour les autres profils, où les roches silicatées non carbonatées étaient dominantes. Il semble donc que la nature carbonatée du profil S9 soit due à une composition de la roche mère plus riche en galets calcaires, à cet endroit.

4.4 Granulométrie

μm	Terre fine (inférieure à 2 mm)					> 2000
	< 2	2 - 20	20 - 50	50 - 200	200 - 2000	
Fractions	A argiles	LF limons fins	LG limons grossiers	SF sables fins	SG sables grossiers	EG éléments grossiers

Tableau 4.1 : Classes granulométriques utilisées.

Le tableau 4.1 présente les classes granulométriques qui ont été utilisées dans ce travail. Comme il l'a déjà été mentionné au chapitre 3, l'analyse granulométrique a été effectuée en deux parties. Les fractions des argiles aux sables fins (0.3 à 200 μm) ont été analysées par granulométrie laser. Les fractions supérieures à 200 μm ont été estimées par pesées.

L'étude granulométrique a été effectuée pour le profil S17, profil de référence, développé sur molasse gréseuse, et pour le profil S12, situé sur la Commounaille. Le profil de sol S12 a été choisi pour représenter l'évolution granulométrique des sols formés sur la colline de la Commounaille.

Il est à noter que les horizons les plus superficiels des deux profils, c'est-à-dire les horizons A₁, n'ont pas pu être analysés pour la granulométrie, car la totalité des échantillons avait été utilisée pour les analyses XRF et XRD.

- **Fractions inférieures à 200 μm**

La figure 4.3 présente l'évolution granulométrique au sein du profil S17. Comme il l'a été évoqué au chapitre 3 sur les méthodes d'analyses, premièrement, la roche mère (OMM, échantillon BDB-25) a été décarbonatée au HCl avant l'analyse granulométrique, afin de détruire le ciment calcaire. Deuxièmement, les échantillons ont été tamisés à 200 μm, car l'appareil de granulométrie laser ne mesure pas les fractions de taille supérieure à 300 μm.

La superposition des courbes granulométriques cumulées correspond, en terme de trajet granulométrique, à une évolution par fragmentation physique. La plupart des sols en climat tempéré suivent cette évolution granulométrique (LEGROS, 1982, cité par DALLA PIAZZA, 1996). La roche mère est d'abord décarbonatée, puis la taille des grains diminue au cours du temps par fragmentation. Les particules de sables grossiers dont était constituée la roche mère se transforment en sables fins, les sables fins en limons grossiers, les limons grossiers en limons fins etc. Ces résultats sont une première confirmation que la couverture pédologique dérive bien de l'altération de la roche sous-jacente.

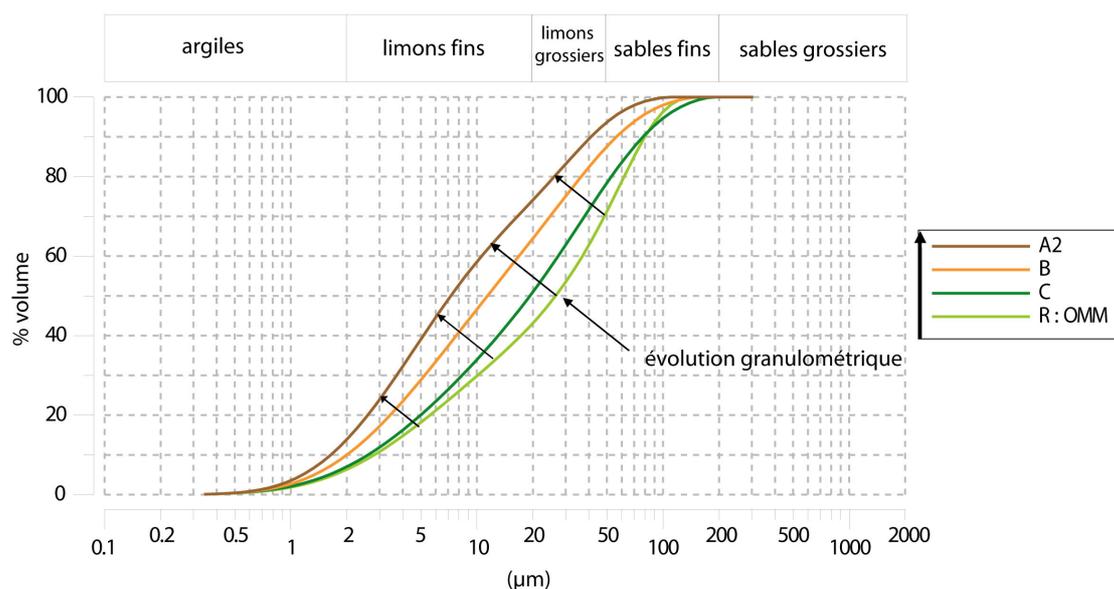


Figure 4.3 : Courbes granulométriques cumulées des horizons du profil S17. Les échantillons ont été tamisés à 200 μm , et la matière organique a été détruite avec de l' H_2O_2 . OMM correspond à l'échantillon BDB-25, molasse gréseuse saine, mais décarbonaté à l' HCl .

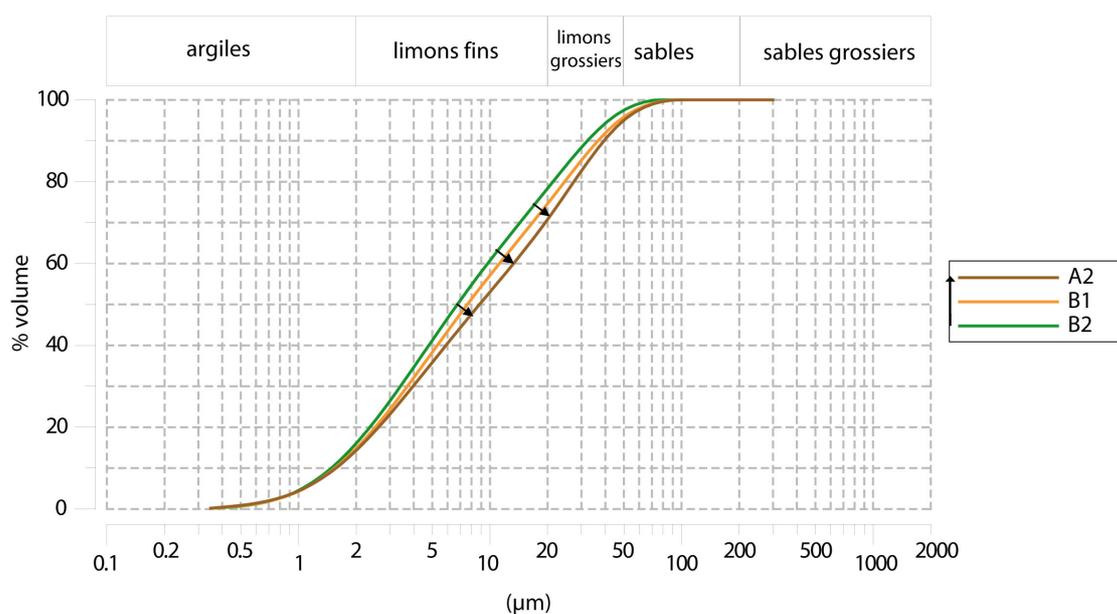


Figure 4.4 : Courbes granulométriques cumulées des horizons du profil S12.

La figure 4.4 présente les courbes granulométriques cumulées des horizons du profil S12. On remarque une plus grande homogénéité texturale au sein du profil développé sur la colline de la Commounaille, par rapport à celui développé sur molasse. En ce qui concerne le trajet granulométrique, on observe ici une grande différence avec le profil S17. Pour S12, la texture devient légèrement plus fine en profondeur. Cela pourrait correspondre à une évolution par dissolution chimique (LEGROS 2007). Les particules les plus fines, ayant un rapport surface/masse plus grand, elles sont d'avantages sollicitées par la dissolution. Elles disparaissent ainsi plus rapidement que les particules plus grossières, avec pour conséquence une trajectoire granulométrique en direction du

pôle sableux. Toutefois, en climat tempéré, on observe plus généralement une évolution par fragmentation physique. L'analyse granulométrique du profil S17 l'a confirmé et il semble donc peu probable que le profil S12 ne suive pas cette évolution également. L'hétérogénéité de la roche mère pourrait être la cause de cette évolution granulométrique inverse. En effet, si la roche mère n'est pas homogène au départ, il n'est plus possible de caractériser l'évolution granulométrique. Dans le cas du profil S12, la roche mère est composée de moraine. Son hétérogénéité n'est donc pas étonnante.

- **Fractions supérieures à 200 μm**

En ce qui concerne les fractions du profil S17 de taille supérieure à 200 μm (tableau 4.2), on remarque que les principales différences se trouvent entre 200 μm et 1 mm. Les tailles supérieures à 1 mm ne sont quasiment pas représentées.

S17 % poids	0 à 200 μm	200 μm à 1 mm	1 mm à 2 mm	> 2 mm
A ₂	67.7	29.9	1.1	1.3
B	63.6	36.2	0.3	0
C	78.1	21.9	0	0
R	62.0	38.0	0	0

Tableau 4.2 : Teneurs en % poids pour les différentes fractions du profil S17. R correspond à l'échantillon BDB-25.

Les horizons A₂, B et R présentent des proportions cohérentes avec une évolution par fragmentation physique, les horizons plus proches de la surface, voyant leurs proportions en éléments fins augmenter, au dépend des éléments plus grossiers. Seul l'horizon C sort du lot, avec une plus grande proportion de matériel fin. Des critères simplement visuels, mais également les résultats obtenus par XRF et XRD (voir plus loin), indiquent que l'horizon C est bien issu de la même roche que l'échantillon BDB-25. Il semble donc qu'il s'agisse ici simplement d'une hétérogénéité de la roche mère. L'horizon C dérive vraisemblablement d'un faciès de la roche mère légèrement plus fin, alors que les horizons A₂ et B dérivent d'un faciès plus grossier, semblable à l'échantillon BDB-25.

Le tableau 4.3 donne les teneurs en % poids pour les différentes fractions du profil S12. Si l'on compare ces valeurs à celles du profil S17, on remarque que les éléments de taille supérieure à 2 mm sont relativement abondants dans S12, alors qu'ils sont quasiment absents dans S17. Ceci vient confirmer que le profil S12 ne s'est pas développé à partir de la même roche mère que le profil S17, mais à partir d'une roche mère plus graveleuse : la moraine.

S12 % poids	0 à 200 µm	200 µm à 1 mm	1 mm à 2 mm	> 2 mm
A ₂	52.6	32.0	3.6	11.9
B ₍₁₎	68.2	16.5	4.3	11.0
B ₍₂₎	71.2	21.1	3.5	4.2

Tableau 4.3 : Teneurs en % poids pour les différentes fractions du profil S12.

Si l'on compare les différents horizons du profil S12 entre eux, on observe que la teneur en éléments grossiers augmente vers la surface. Les horizons A₂ et B₍₁₎ sont notamment caractérisés par environ 11 % d'éléments de taille supérieure à 2 mm, alors que l'horizon le plus profond en contient seulement 4 %. On en déduit que la moraine à partir de laquelle s'est formée le profil S12 était plus graveleuse en surface et plus fine en profondeur. Ces résultats concordent avec les résultats obtenus sur les fractions inférieures à 200 µm, qui montraient également que la texture devenait plus fine en profondeur.

4.4.1 Conclusion sur les descriptions physiques et l'étude granulométrique

En ce qui concerne le profil S17, l'autochtonie de la couverture pédologique paraît assez évidente, en raison de la présence de l'horizon C, horizon de transition entre le sol et la roche saine. Cet horizon correspond au début de l'altération de la molasse gréseuse, à savoir sa décarbonatation. Il a en outre gardé certaines caractéristiques de la molasse saine, notamment sa couleur gris-verdâtre. Cet horizon passe graduellement à l'horizon B, clairement pédogénétique comme le trahit sa couleur brune, puis aux horizons brun foncé A, riches en matière organique. Le profil est donc caractérisé par des transitions graduelles entre la molasse gréseuse saine, représentée par l'échantillon BDB-25, la molasse décarbonatée (horizon C) et finalement les horizons du sol.

L'étude granulométrique vient également confirmer l'autochtonie pédologique du profil S17. L'évolution granulométrique du profil S17 est celle d'une diminution de la taille des grains par fragmentation physique. Ceci est caractéristique des sols sous climat tempéré et vient confirmer une hypothèse de formation in situ du sol. Le profil S17 a été formé par l'altération, sur place, de la molasse. L'étude des éléments grossiers vient légèrement interférer dans ces conclusions. Elle montre que l'horizon C est d'une texture plus fine que les horizons plus superficiels. Toutefois, les différences granulométriques entre C et les autres horizons se trouvent principalement dans la classe comprise entre 200 µm et 1 mm. L'hétérogénéité est donc de nature sableuse et non graveleuse, les éléments plus grossiers que 1 mm étant généralement inexistantes. Donc, il ne semble pas que cette texture plus grossière en surface soit due à une influence morainique, mais plutôt due à une hétérogénéité verticale de la roche mère.

Dans le cas du profil S12, il ne fut pas possible de descendre en dessous de 90 cm. À cette profondeur, on se trouve encore dans l'horizon B. La description physique du

profil ne permet donc pas de faire d'hypothèse précise sur la roche mère et sur l'autochtonie de la couverture pédologique.

En ce qui concerne l'étude granulométrique, le profil S12, ne suit pas la même évolution que le profil S17. Au contraire, les horizons présentent des textures plus fines en profondeur. Cela confirme que la roche mère dont il est issu est différente de celle qui est à la base du profil S17. L'étude des éléments de tailles supérieures à 200 μm montre qu'une composante graveleuse (grains > 2 mm) vient influencer ce profil. Ceci est attribué à l'influence de la moraine.

4.5 Chimie (XRF)

4.5.1 *Éléments majeurs*

- **Précautions**

Les données XRF sont à utiliser avec précaution. En effet, les valeurs sont normalisées à 100 % et ainsi elles sont toutes relatives les unes aux autres. Si la teneur en un élément augmente, cela n'est pas forcément dû à son augmentation réelle dans le sol, mais peut-être à la diminution d'un autre élément. Des calculs de concentrations iso-quartz ou iso-zirconium sont possibles pour contourner ce problème. Si l'on considère que le quartz est un minéral inaltérable et que l'on connaît sa teneur dans la roche mère et le long du profil, on peut recalculer les valeurs obtenues par XRF en considérant que le pourcentage de quartz doit rester constant le long du profil. Le même raisonnement est possible avec le zirconium (Zr), généralement considéré comme invariant dans le sol. En effet, Zr se trouve principalement dans le zircon, minéral très résistant à l'altération. Toutefois, dans les deux cas, il faut faire l'hypothèse que la roche mère a une composition homogène en quartz ou en zirconium. Cela est impossible dans le cas du profil S17, car seul un échantillon de molasse gréseuse a été analysé. De plus, DALLA PIAZZA (1996) a montré que la molasse gréseuse de la région de Lutry présentait de fortes hétérogénéités en Zr. Dans le cas des horizons développés sur la colline de la Commounaille, il paraît également peu raisonnable d'utiliser un tel procédé, sachant que la roche mère est constituée de moraine, et donc vraisemblablement très hétérogène.

Les résultats XRF seront donc analysés sans modification, en gardant à l'esprit qu'il faut être prudent dans l'interprétation. Les éléments majeurs sont exprimés en pour cent poids et sous forme d'oxydes. Les valeurs ont tout de même été recalculées à 100% sans le pourcentage de LOI (perte au feu), pour éviter les phénomènes de dilution par la matière organique dans les horizons supérieurs.

- Erreur standard

L'erreur standard sur les résultats XRF peut être parfois assez grande, par rapport aux variations de teneurs dans le sol. Elle est représentée sur les graphiques par une barre d'erreur, sauf dans le cas des graphiques de type *horizons de sol VS roche mère* où l'erreur standard est plus petite que le symbole.

a. Profil S17

La figure 4.5 met en comparaison la composition en éléments majeurs de la molasse gréseuse saine (échantillon BDB-25) par rapport aux horizons de sols du profil S17.

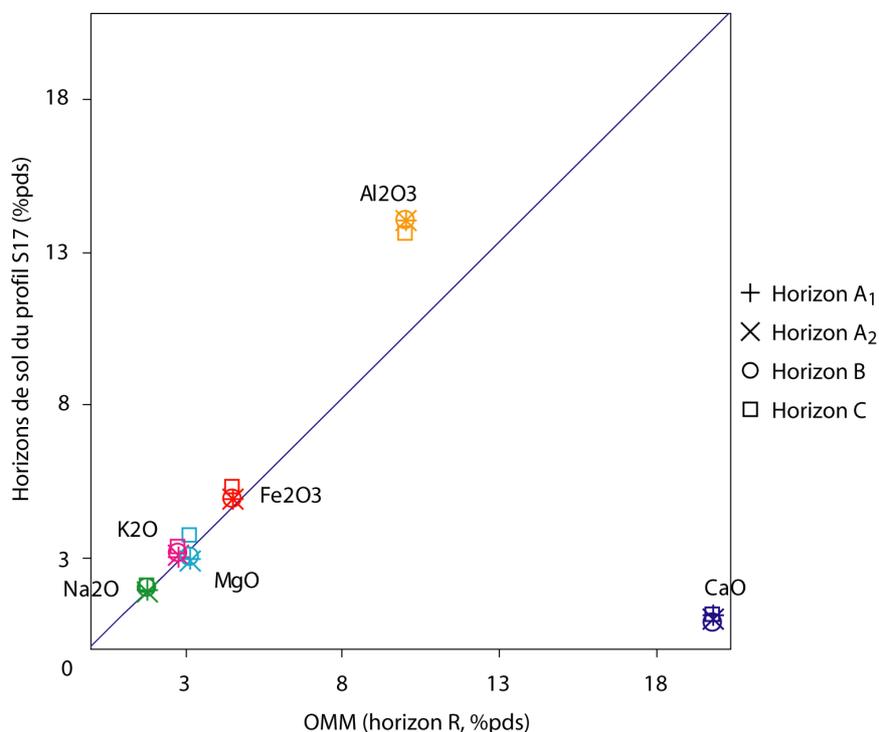


Figure 4.5 : Pourcentages du profil S17 en éléments majeurs, exprimés sous forme d'oxydes, en % poids. Ce graphique met en comparaison les teneurs des horizons de sol et les teneurs de la roche mère saine (BDB-25). Les résultats ont été obtenus par XRF, et l'erreur standard est plus petite que le symbole. Les pourcentages ont été recalculés sans le LOI (perte au feu). La droite représente une fonction 1 : 1.

Il apparaît comme principale différence un fort enrichissement en CaO de la molasse et au contraire un enrichissement du sol en Al₂O₃. La faible teneur en CaO dans les horizons de sol s'explique par une décarbonatation totale et une lixiviation du CaO. Comme il l'a déjà été mentionné, la décarbonatation est effectivement un stade précoce de la pédogenèse. Ceci est confirmé par les analyses XRD qui ont montré que l'échantillon de molasse gréseuse BDB-25 contient 40 % de calcite (voir point 4.6), alors que l'horizon C et le reste du profil de sol en sont totalement dépourvus. La figure 4.6 montre que Ca subit effectivement une lixiviation majeure dès qu'il a passé le front de décarbonatation. Le strontium (Sr), élément en traces associé aux carbonates, montre également une forte élimination liée à la décarbonatation.

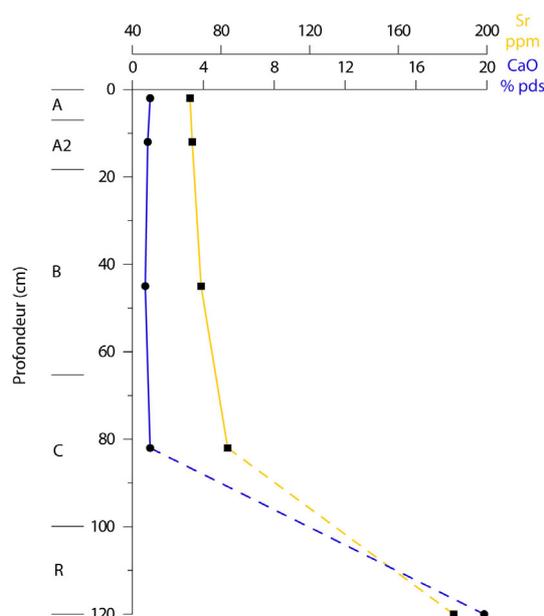


Figure 4.6 : Comportement de Ca et Sr le long du profil S17. L'horizon R, correspond à l'échantillon BDB-25. L'erreur n'a pas été reportée sur ce graphique, car elle est nettement plus petite que la différence de teneurs entre l'horizon C et de l'horizon R.

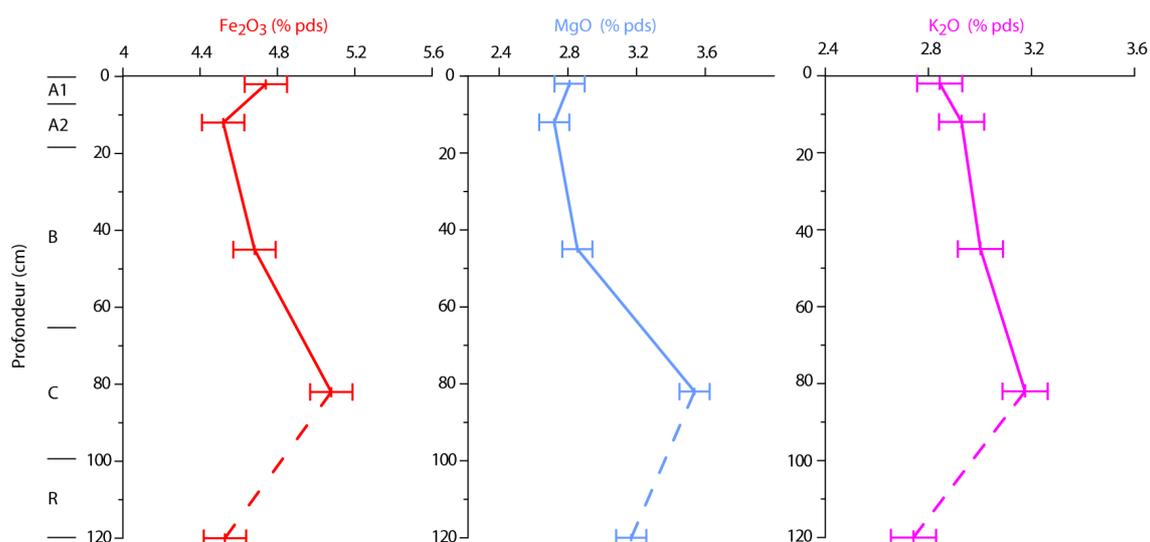


Figure 4.7 : Teneurs en Fe₂O₃, MgO et K₂O le long du profil S17. Les valeurs sont exprimées en pour cent poids d'oxydes. Les barres horizontales représentent l'erreur standard.

La Figure 4.7 montre que les éléments tels que K, Fe et Mg présentent une forte discontinuité géochimique entre la molasse gréseuse saine et les horizons de sol. Ces éléments se trouvent donc préférentiellement dans le résidu de décarbonatation, et leur enrichissement dans l'horizon C par rapport à l'horizon R est dû à la dissolution du ciment calcaire de la molasse au début de l'altération. Ensuite, leur diminution progressive vers la surface est due à leur lixiviation progressive au cours de la pédogenèse.

La figure 4.8 compare à nouveau la composition en éléments majeurs de la molasse gréseuse saine (échantillon BDB-25) par rapport aux horizons de sols du profil S17, mais cette fois, les teneurs en éléments majeurs de la molasse ont été recalculées pour

que le pourcentage de CaO de la molasse corresponde à celui des horizons de sol. On obtient ainsi les pourcentages théoriques de la molasse gréseuse, après une décarbonatation et une élimination théorique du Ca.

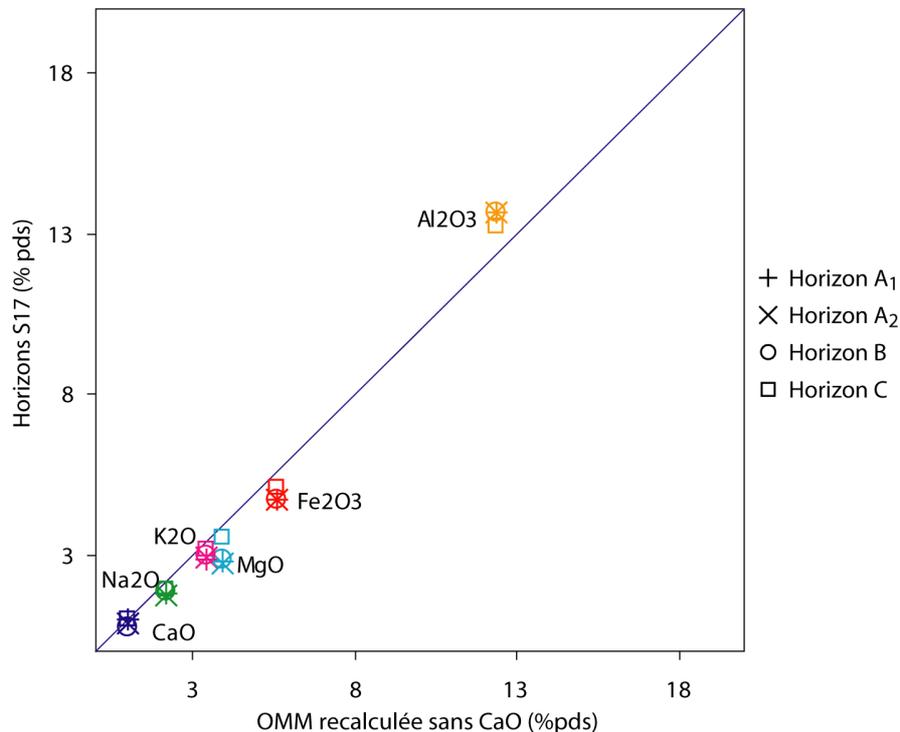


Figure 4.8: Pourcentages du profil S17 en éléments majeurs, exprimés sous forme d'oxydes. Ce graphique met en comparaison les teneurs des horizons de sol et la roche mère saine (BDB-25), dont les teneurs ont été recalculées pour que CaO corresponde aux teneurs dans les horizons de sol.

On observe qu'une fois décarbonatée et décalcifiée, la molasse serait encore enrichie en Na_2O , K_2O , MgO et Fe_2O_3 , par rapport aux horizons de sols. Cela confirme qu'après la décarbonatation et la lixiviation du Ca, intervient la lixiviation des éléments Mg, Na, K et Fe, au cours de la pédogenèse. Al tend par contre à rester dans le sol. De plus, on remarque que cet enrichissement relatif de la molasse en éléments solubles est moins important par rapport à l'horizon C. Cela confirme que la décarbonatation et l'élimination de Ca ont déjà affecté l'horizon C, mais que la lixiviation n'y a pas encore été aussi intense que dans les horizons supérieurs.

b. Profil S12

La figure 4.9 présente les teneurs en éléments majeurs du profil S12. N'ayant dans ce cas pas de valeur pour une potentielle roche mère, la partie la plus profonde de l'horizon B ($\text{B}_{(2)}$) a été utilisé comme horizon de référence auquel sont comparés les horizons supérieurs.

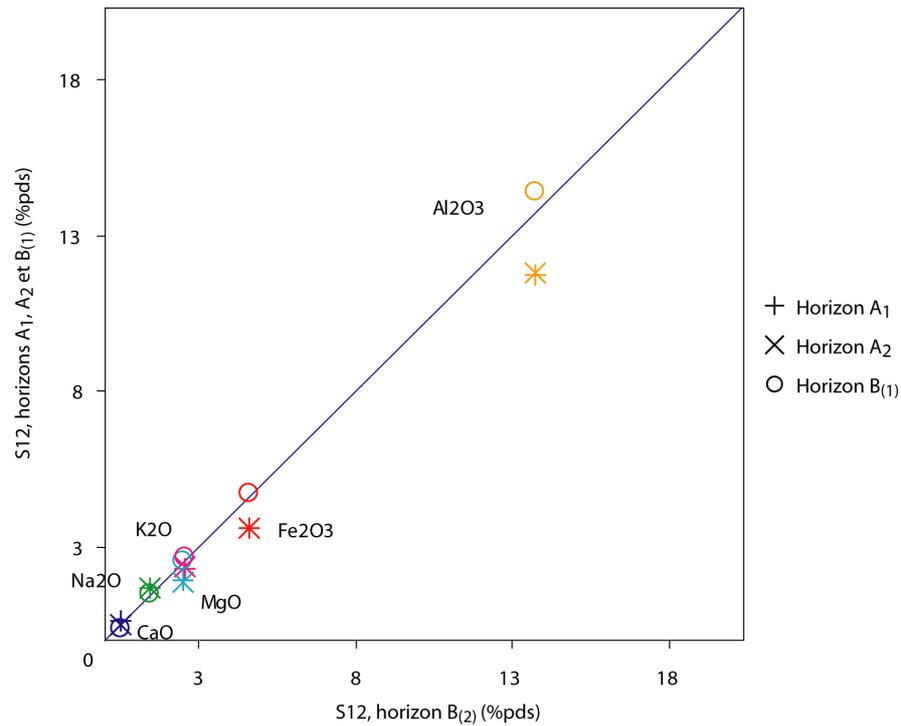


Figure 4.9 : Pourcentages du profil S12 en éléments majeurs, exprimés sous forme d'oxydes. L'horizon le plus profond ($B_{(2)}$) a été mis en abscisse et sert d'horizon de référence dans la comparaison avec les horizons supérieurs. Les valeurs sont exprimées en % poids.

On remarque premièrement que tous les horizons sont décarbonatés et que le calcium y a été passablement éliminé. Deuxièmement, on remarque que les horizons A_1 et A_2 sont appauvris en Al, Fe, Mg et K. Ce sont ici les effets de la lixiviation des éléments, plus intense dans les horizons les plus anciens. On observe que l'horizon B présente des concentrations assez homogènes, puisque sa partie supérieure ($B_{(1)}$) présente des valeurs plutôt proches à celles de la partie profonde ($B_{(2)}$).

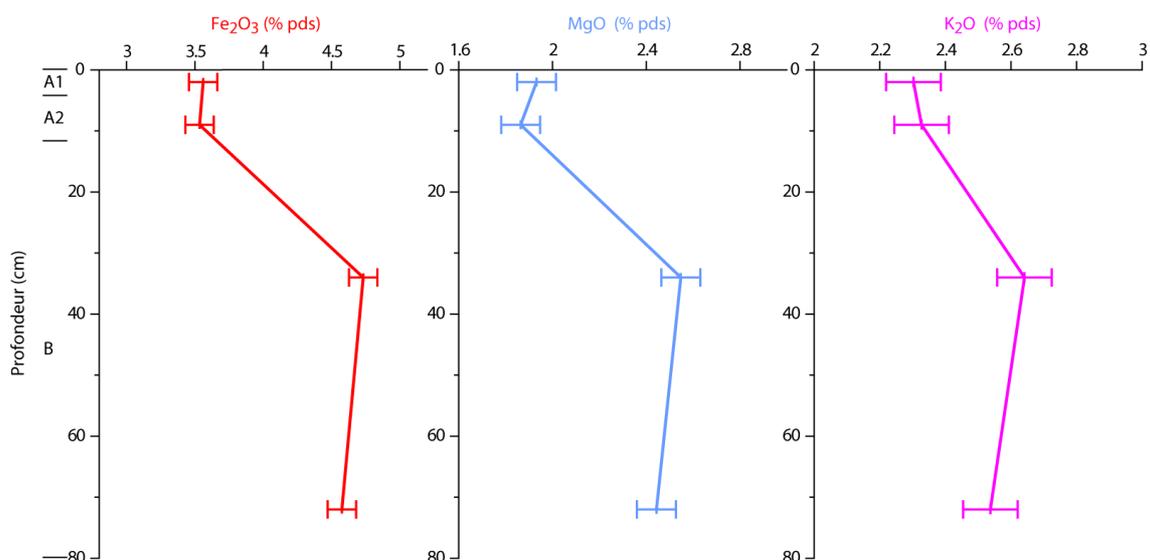


Figure 4.10 : Teneurs en Fe_2O_3 , MgO et K_2O , le long du profil S12. L'unité est en % poids.

La figure 4.10 montre à nouveau la même chose, à savoir la lixiviation des éléments K, Mg et Fe dans les horizons supérieurs. On peut voir sur cette figure que les variations entre B₍₁₎ et B₍₂₎ sont plus petites que l'erreur analytique. Ainsi, on peut dire que l'horizon B présente des concentrations homogènes verticalement.

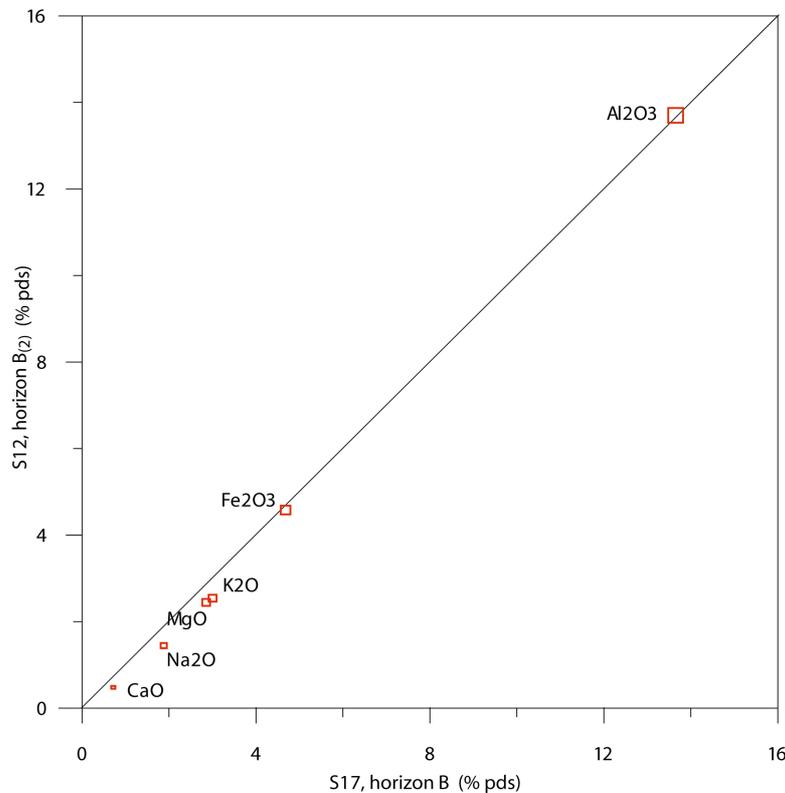


Figure 4.11 : Comparaison entre les horizon B des profil S17 et S12. La taille des rectangles rouges correspond à l'erreur standard.

Si l'on compare les horizons B des profils S17 et S12 (figure 4.11), on remarque que leurs compositions en éléments majeurs sont proches d'une relation 1 : 1. En se basant sur l'analyse seule des éléments majeurs, il paraît difficile de distinguer si la roche mère est différente dans les deux cas. Les deux horizons pourraient avoir dérivé d'une même roche mère, la lixiviation ayant simplement été légèrement plus important dans le cas de S12. Pourtant, nous sommes partis de l'hypothèse que la roche mère du profil S12 est morainique et non molassique. D'un autre côté, nous savons que la moraine est formée principalement de matériel molassique remanié auquel s'ajoute des galets alpins. Le matériel molassique est vraisemblablement celui qui est le plus fin, car il a été remanié et raboté sous le glacier. S'il est plus fin, il est également plus facilement altérable. Il semble donc ici que ce soit la composante molassique de la moraine qui ait le plus contribué à la composition en éléments majeurs du sol.

4.5.2 Conclusions sur les éléments majeurs

L'analyse des éléments majeurs a montré que les principaux processus qui les affectent, au sein du profil S17, sont la décarbonatation et la lixiviation des éléments

solubles. Ce sont les mêmes processus qui semblent affecter la composition en éléments majeurs du profil S12. Il semble que chimiquement, le profil S12 pourrait dériver de la même roche mère que le profil S17. Toutefois, les observations sur le terrain et l'analyse granulométrique ont mis en évidence une influence morainique. Mais comme nous l'avons vu au point 2.6.1, sur les roches mères potentielles, la moraine de fond est formée avant tout de matériel molassique remanié auquel s'ajoute des galets alpins. Il paraît donc plausible que ce soit la composante molassique, plus fine et altérable, qui participe le plus à la pédogenèse, alors que les galets alpins résiste mieux à l'altération. On retrouve d'ailleurs sur le terrain énormément plus de galets et de blocs alpins que de blocs de molasse gréseuse. De plus, les quelques galets de molasse retrouvés dans le sol étaient déjà bien altérés, alors que les galets de granites ou de gneiss, par exemple, se trouvaient dans un état de fraîcheur étonnant.

Le point suivant traite des éléments en traces dans le sol, dans le but d'essayer d'y trouver une influence chimique de la moraine.

4.5.3 *Éléments en traces*

La molasse est un sédiment qui dérive de l'érosion des Alpes. La moraine du Plateau remanie cette molasse et y ajoute une composante nouvelle alpine : ce sont des blocs, galets et graviers alpins apportés par les glaciers. En fin de compte, les deux lithologies, molasse et moraine, sont des produits de l'érosion alpine. Mais la moraine est beaucoup plus jeune et les roches qui étaient à l'affleurement dans les Alpes au burdigalien (20 Ma) ne sont pas les mêmes que celles qui étaient à l'affleurement au Würm. De plus, l'agent d'érosion et le mode de dépôt sont bien différents dans les deux cas. Dans le cas de la molasse burdigalienne, l'agent d'érosion est une rivière et le dépôt s'est fait dans une mer. La molasse de la région est un sable dont la taille des grains se situe autour de 0.4 mm. On trouve certains niveaux conglomératiques, mais ils sont rares. On en déduit donc qu'un fort tri a été effectué par la rivière, avant le dépôt. Seuls les grains de sable sont arrivés jusqu'ici. Les grains plus grossiers sont restés en amont, les grains plus fins ont été transportés plus loin en aval. De plus, seuls les grains les plus résistants vont atteindre un lieu de dépôt relativement éloigné de la source. Dans le cas de la moraine, le tri est moins grand, le glacier transportant à sa surface des éléments de toute taille.

Les galets et les blocs rencontrés dans la région sont principalement des granites et gneiss divers, des quartzites, mais également des calcaires divers et des morceaux de molasse. Sur le terrain, il semblait assez évident que, parmi les galets présents dans le sol, ceux de molasse étaient beaucoup plus altérés que ceux de granites ou de gneiss. D'autre part, la partie fine de la moraine est créé par l'abrasion de la roche sous-jacente par la glace. Sur le Plateau, la roche abrasée est la molasse. Ainsi, on peut supposer que la partie fine de la moraine se compose avant tout de molasse. Et c'est la partie fine qui sera la moins résistante à l'altération. On peut donc supposer que c'est la composante molassique de la moraine, tant les blocs et galets « erratiques » de molasse que la partie

fine, qui a le plus participer à la pédogenèse. C'est ce que l'étude des éléments majeurs a suggéré.

Pourtant, il existe une différence entre les deux matériaux et peut-être que les éléments en traces permettront de la mettre en évidence. Le but étant de différencier les sols formés sur moraine des sols formés sur molasse, différents éléments en traces ont été choisis en fonction de leurs caractéristiques.

- **Caractéristiques des éléments en traces (DALLA PIAZZA 1996)**

Le baryum (Ba) : Cet élément se concentre dans les roches magmatiques intermédiaires à acides (400-1200 ppm). Le rayon ionique de Ba^{2+} est très semblable à celui de K^+ , ainsi il le remplace dans les biotites et les feldspaths potassiques.

Le nickel (Ni) : Le nickel est très souvent associé au fer. Il est généralement concentré dans les roches ultramafiques (jusqu'à plus de 1000 ppm), alors que les roches acides en sont presque dépourvues. Les roches sédimentaires présentent généralement de faibles quantités en Ni.

Le Chrome (Cr) : Il est essentiellement associé aux roches mafiques et ultramafiques, où il peut atteindre 100 à 2000 ppm.

Le plomb (Pb) : Cet élément est présent dans les roches sous formes de sulfure ou associé aux feldspaths, dans lesquels il se substitue au potassium. Il peut également être d'origine anthropogène.

Le zirconium (Zr) : le zirconium se trouve principalement sous forme de zircon ($ZrSiO_4$), minéral qui se trouve principalement dans les granitoïdes et les roches gneissiques qui en dérivent. Du fait de sa grande résistance, on le retrouve également dans les roches sédimentaires.

Le titane (Ti) : Le titane se trouve dans les roches ignées et métamorphiques, principalement sous forme d'oxydes, notamment le rutile (TiO_2) et l'ilménite ($FeTiO_3$).

La figure 4.12 montre clairement qu'il existe une relation linéaire entre le Ba et le K dans le sol. L'augmentation en potassium est accompagnée d'une augmentation en Ba. Ceci est dû au fait que Ba^{2+} se substitue à K^+ dans les minéraux, principalement les K-feldspaths, en raison de son rayon ionique proche du potassium.

En outre, on remarque que les profils de sols formés au sein de la Commounaille font partie d'une population distincte de celle qui englobe les valeurs du profil S17. Pour des teneurs plus faibles en K_2O , les sols formés sur moraine présentent des teneurs en Ba plus fortes. On voit également que S17 est directement issu de la molasse gréseuse (étoile rouge) alors que ce n'est pas le cas des profils de sol de la Commounaille.

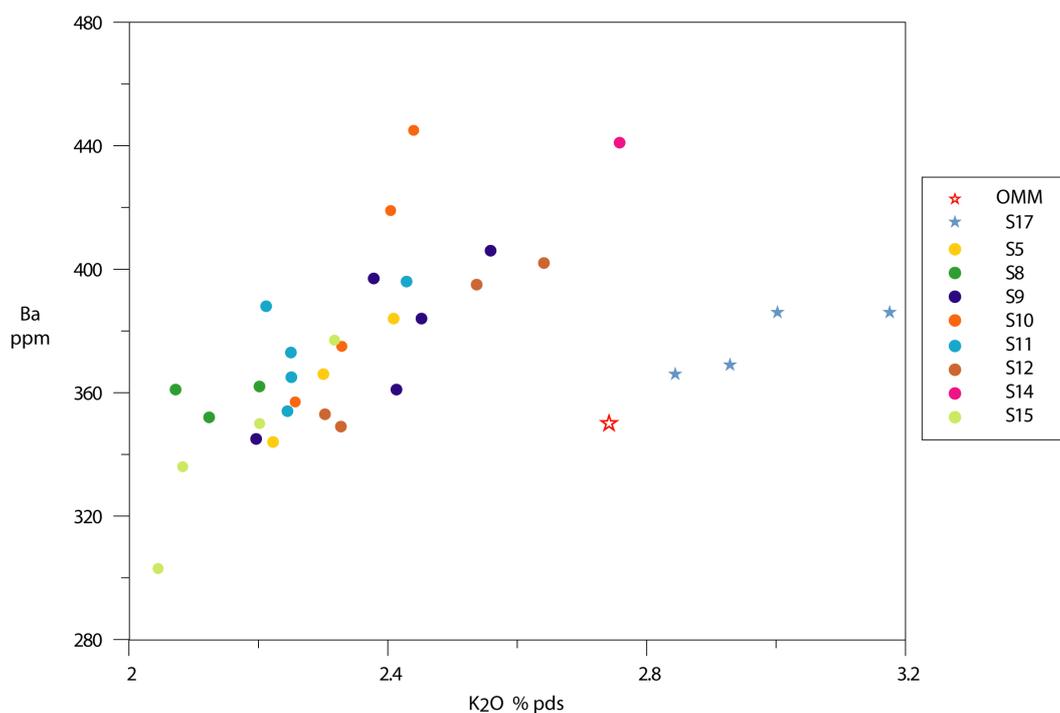


Figure 4.12 : Ba vs K₂O. Le baryum est exprimé en ppm et K₂O en pour cent poids. Les étoiles bleues correspondent aux horizons du profil S17 et l'étoile rouge correspond à la molasse gréseuse (OMM) échantillonnée proche du profil S17 (échantillon BDB-25). Les symboles ronds correspondent aux profils de sol échantillonnés au sein du massif forestier de la Commounaille.

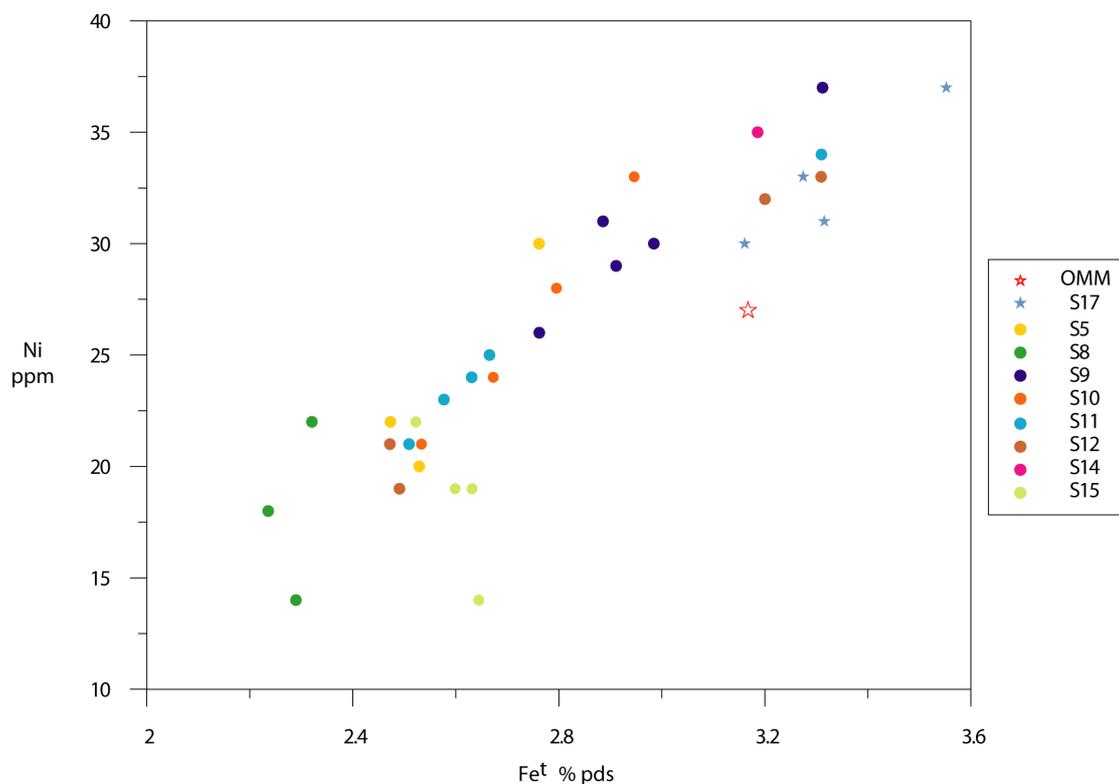


Figure 4.13 : Ni vs Fe^t. Le fer est exprimé sous forme élémentaire et correspond à la concentration de fer total.

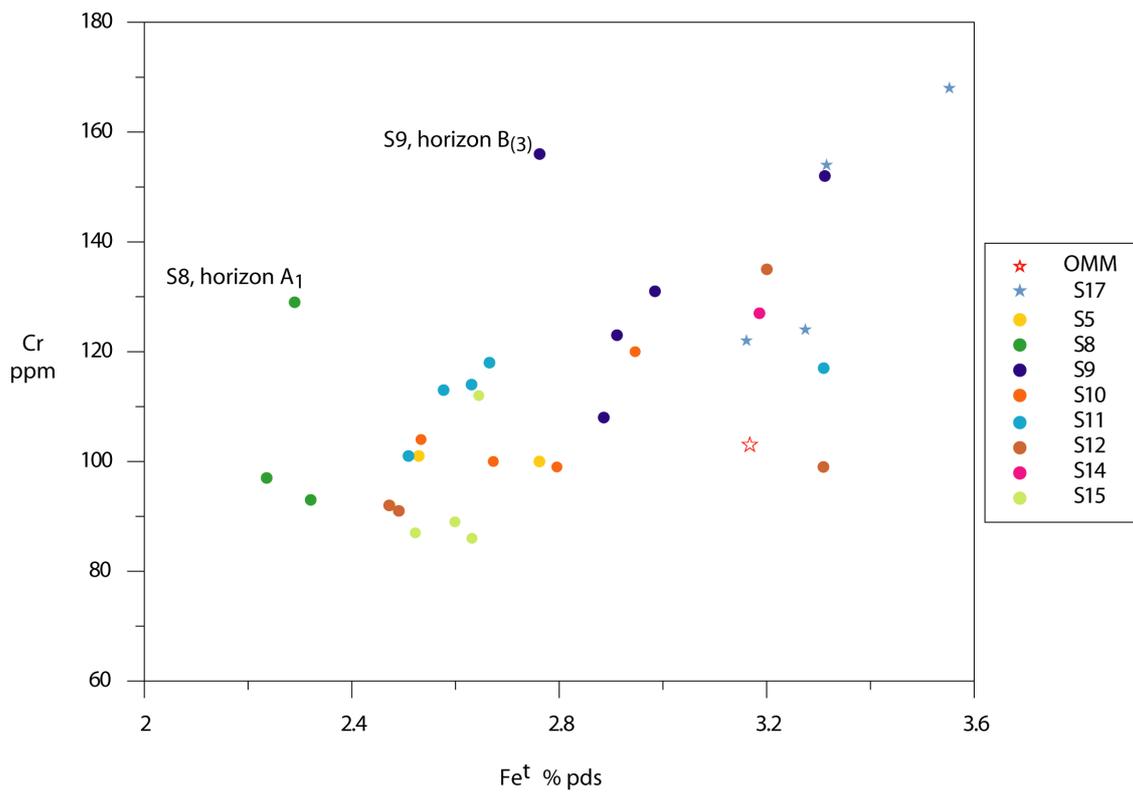


Figure 4.14 : Cr vs Fe^t.

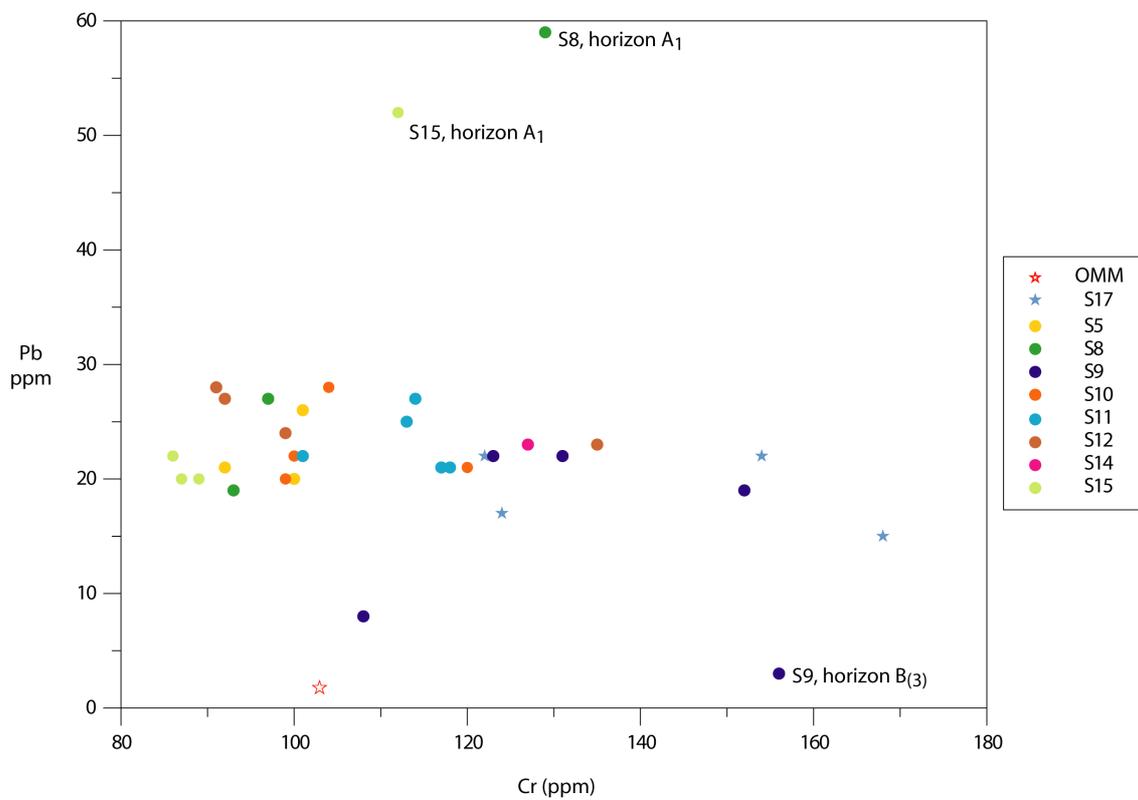


Figure 4.15 : Pb vs Cr.

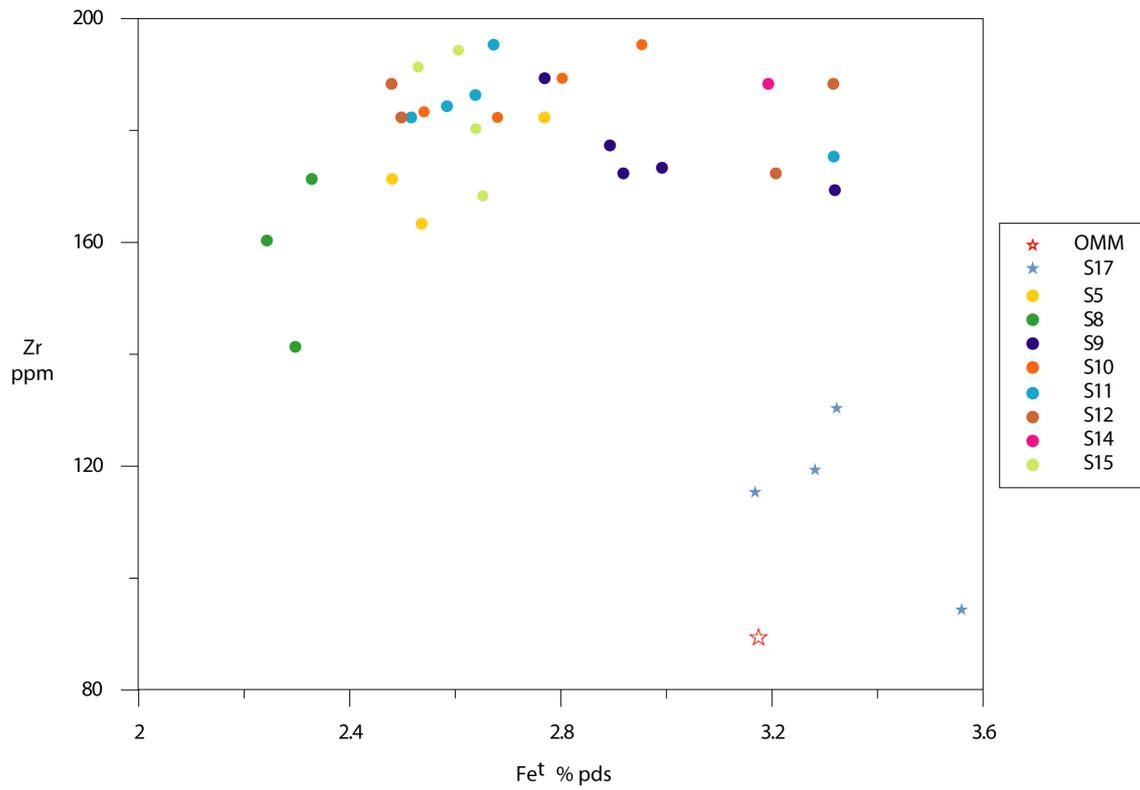


Figure 4.16 : Zr vs Fe^t.

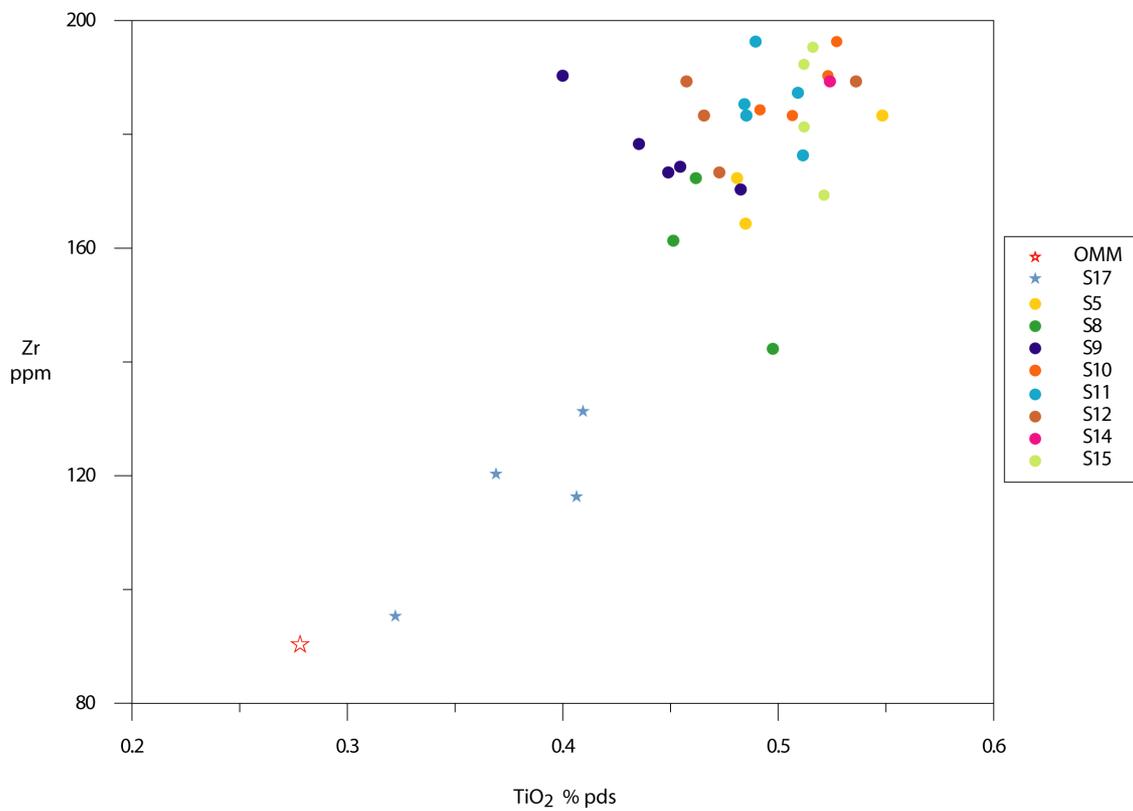


Figure 4.17 : Zr vs TiO₂.

La figure 4.13 montre qu'il existe une très bonne relation linéaire entre le taux de Fe^t et celui de Ni. On remarque donc que ces deux éléments sont associés aux mêmes minéraux et qu'une augmentation en fer s'accompagne d'une augmentation en nickel. Le profil S17 fait cette fois partie de la même population que les sols formés au sein de la Commounaille. Néanmoins, on observe à nouveau que les horizons du profil S17 dérivent bien de la molasse gréseuse, alors que ce n'est pas le cas des profils développés sur la colline de la Commounaille. On peut également voir que le profil S17 présente des teneurs en Ni et Fe en moyenne plus fortes que les profils de sols de la Commounaille.

À partir de la figure 4.14, on remarque qu'il existe également une bonne relation linéaire entre Fe et Cr. Il n'existe pas de véritable distinction entre les profils formés sur moraine et celui formé sur molasse, mais, à nouveau, on voit que le profil S17 est en moyenne plus riche en Fe et Cr que les profils de sols de la Commounaille. Deux horizons présentent une anomalie en Cr, avec des valeurs qui s'écartent de la relation linéaire avec le fer. Il s'agit de l'horizon A₁ du profil S8 et de la partie la plus profonde de l'horizon B du profil S9 (B₍₃₎). Dans le cas de S8, c'est l'horizon le plus superficiel qui est concerné. Il s'agit donc vraisemblablement d'une pollution anthropique. Le profil a d'ailleurs été prélevé aux abords d'un sentier très récemment aménagé. Dans le cas du profil S9, c'est l'horizon le plus profond qui est concerné. L'anomalie est donc plus vraisemblablement d'origine naturelle. La figure 4.15 montre que l'anomalie en chrome dans l'horizon A₁ du profil S8 est également accompagnée d'une forte anomalie en plomb. Ce dernier élément est vraisemblablement d'origine anthropique, comme le confirme sa présence dans le sol, mais sa teneur très faible dans la molasse gréseuse. De plus il ne semble pas exister de relation entre K et Pb. Ceci montre que le Pb n'est, dans ce contexte, pas associé aux feldspaths. L'anomalie en plomb de l'horizon S8 est donc une confirmation que l'anomalie en chrome est due à une pollution anthropique. On peut voir que, dans le sol, un fond pédogéochimique s'est désormais constitué, dont les valeurs en Pb varient entre 15 et 30 ppm. Les anomalies en plomb se distinguent clairement de ce fond pédogéochimique. En plus de l'horizon superficiel du profil S8, on voit que l'horizon A₁ du profil S15 présente également une contamination en plomb. Dans le cas de l'horizon B₍₃₎ du profil S9, on remarque que l'anomalie en Cr n'est pas accompagnée par une anomalie en Pb. Cet horizon présente même une concentration en Pb faible, par rapport au fond pédogéochimique. Ceci confirme que l'anomalie en Cr est d'ordre naturel.

À partir de la figure 4.16, on remarque qu'il n'existe pas de relation entre Fe et Zr. On note, par contre, que les échantillons prélevés dans forêt de la Commounaille forment une population bien distincte du profil S17. Les profils de sols de la Commounaille présentent des valeurs en Fe variables, mais des valeurs en Zr nettement supérieures à celles du profil S17, autour de 180 ppm. Le profil S17 est caractérisé par des valeurs plus fortes en Fe, mais des valeurs inférieures en Zr, autour de 110 ppm. La figure 4.17 montre que les horizons sol de la Commounaille sont globalement enrichis en Zr et en Ti, par rapport au profil S17. Ces deux éléments couplés permettent une

bonne distinction entre les deux types de sols. On voit que les profils de sols développés sur la colline de la Commounaille sont plus riches en Ti et Zr par rapport au profil S17, formé à partir de la molasse gréseuse. Le zirconium se trouve principalement sous forme de zircon ($ZrSiO_4$), minéral très résistant à l'altération. Ainsi, si les teneurs en zirconium augmentent, c'est que le pourcentage en zircon a augmenté.

4.5.4 Conclusions sur l'analyse des éléments en traces

L'analyse des éléments en traces a montré que certains éléments permettaient une différenciation entre les sols formés sur moraine et ceux formés sur molasse. Les éléments comme le nickel et le chrome, associés au fer dans les roches mafiques, ne permettent pas de véritable distinction entre les sols formés sur moraine et ceux formés sur molasse, mais ils sont globalement enrichis dans le profil S17, formé par l'altération de la molasse gréseuse, par rapport aux sols développés sur moraine. Les éléments comme le baryum, le zirconium et le titane, plutôt associés aux roches felsiques, permettent de très bien distinguer géochimiquement les deux types de sols. Il semble donc que l'influence de la moraine sur la chimie des sols soient caractérisée par un apport en éléments en traces associés aux roches felsiques, alors que les sols formés à partir de la molasse gréseuse sont plutôt enrichis en éléments associés aux roches mafiques. Le zirconium se trouve principalement sous forme de zircon, minéral abondant dans les roches granitiques et gneissique. Le zircon est un minéral pratiquement inaltérable. Si la teneur en zirconium augmente dans le sol, c'est donc que la teneur en zircon a augmenté. Ainsi, les teneurs plus fortes en Zr que présentent les profils de sols formés sur la colline de la Commounaille trahissent vraisemblablement une contribution morainique, riche notamment en galets de granites et gneiss. Il paraît plausible de supposer que la moraine contienne plus de zircon que la molasse gréseuse. Premièrement, le zircon est minéral qui se rencontre surtout dans les roches granitiques et gneissiques, roches que l'on retrouve en abondance parmi les galets et les blocs contenus dans les sols de la colline de la Commounaille. Deuxièmement, le zircon est un minéral lourd. Sa densité est de 4,7 alors que la densité du quartz, par exemple, est de 2.65. Ainsi en contexte fluviale, comme c'est le cas de la molasse gréseuse, le zircon sera retenu en aval, alors qu'en contexte glaciaire, ce tri dû à la densité n'a pas lieu.

Le plomb se trouve en faibles teneurs dans la molasse gréseuse, environ 2 ppm, alors que le sol en contient 15 à 60 ppm. Les plus hautes valeurs sont rencontrées dans les horizons véritablement de surface. Ceci semble confirmer que le Pb est d'origine principalement anthropogène. Un fond pédogéochimique s'est établi, dont les valeurs varient entre 15 et 30 ppm.

4.6 Minéralogie (XRD)

Le tableau 4.4 présente une estimation des proportions du profil S17 en minéraux. Les résultats, obtenus par XRD sont exprimés en pour cent poids (% pds).

S17 % pds	qtz	k-fst	ab	cc	phyllosilicates
A ₁	62	16	12	0	10
A ₂	57	12	20	0	11
B	51	15	21	0	13
C	49	13	21	0	17
R	30	8	12	40	10
R*	50	13	21	0	16

Tableau 4.4 : Estimation en pour cent poids pour les minéraux majeurs du profil S17. L'erreur sur chaque valeur est de $\pm 4\%$. R correspond aux valeurs obtenues pour l'échantillon BDB-25. R* représente les mêmes valeurs mais recalculée à 100% en éliminant la calcite.

Il apparaît que la calcite est absente dans les horizons de sol, mais atteint 40 % dans la molasse gréseuse saine (R). Si l'on recalcule à 100% les teneurs de l'horizon R en éliminant la calcite (R*), on obtient des valeurs tout à fait similaires à celles de l'horizon C. La différence minéralogique entre la molasse gréseuse saine et l'horizon C est donc principalement due à la dissolution de la calcite. Cela semble démontrer que l'horizon C est minéralogiquement issu de la molasse gréseuse sous-jacente. On a ici une nouvelle confirmation de la filiation entre la molasse gréseuse (échantillon BDB-25) et la couverture pédologique. On remarque, en outre, que les hétérogénéités granulométriques qui caractérisaient l'horizon C ne se répercutent pas minéralogiquement.

En ce qui concerne le reste du profil, on remarque que le sol reflète la composition minéralogique de la molasse gréseuse, mais des variations sont tout de même visibles. Le quartz augmente de façon significative dans les horizons de surface, alors que les phyllosilicates augmentent en profondeur. On observe une certaine constance dans les teneurs en feldspaths. L'augmentation du quartz vers la surface concorde avec l'hypothèse de l'altération en place de la molasse burdigalienne. En effet, en raison de sa plus forte résistance à l'altération, il est logique de voir le taux de quartz augmenter en surface et de voir au contraire diminuer les autres minéraux. Toutefois, il serait également possible que l'augmentation du quartz soit en grande partie due à la diminution des phyllosilicates en raison de leur lessivage. Si tel était le cas, on observerait une accumulation en argiles dans les horizons profonds. Mais ceci n'est pas le cas, car il n'existe pas de discontinuité entre R* et C, puis les restes des horizons. L'hypothèse de l'augmentation du quartz en surface due à sa grande résistance relative semble être la meilleure.

En ce qui concerne le profil S12 (tableau 4.5), on remarque une minéralogie légèrement différente du profil S17. S17 est plus riche en feldspaths alors que S12 est enrichi en phyllosilicates et en quartz.

S12 % pds	qtz	k-fst	ab	cc	phyllosilicates
A ₁	65	9	17	0	9
A ₂	65	8	18	0	9
B ₍₁₎	58	10	16	0	16
B ₍₂₎	58	8	15	0	19

Tableau 4.5 : Estimation en pour cent poids pour les minéraux majeurs du profil S12. L'erreur sur chaque valeur est de $\pm 4\%$.

En ce qui concerne l'évolution des minéraux le long du profil, les mêmes remarques que pour le profil S17 sont à faire. On observe, à nouveau, une augmentation du quartz dans les horizons de surface en profondeur, alors que les phyllosilicates augmentent en profondeur. Les feldspaths présentent toujours des teneurs stables. L'analyse granulométrique a montré que le pourcentage de sable augmentait dans les horizons supérieurs, mais également que le pourcentage de matériel fin augmentait en profondeur. Il se peut donc que la minéralogie reflète ici la texture des horizons. Toutefois, la plus grande résistance du quartz à l'altération pourrait également être, dans ce cas, la cause de son augmentation en surface.

4.7 Conclusions finales sur les sols

L'étude granulométrique du profil S17 a permis de confirmer qu'il était issu de l'altération en place de la molasse gréseuse. L'analyse chimique a montré que les principaux processus qui intervenaient dans la pédogenèse étaient la décarbonatation de la roche mère, puis la lixiviation des cations tels Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et Fe^{3+} . Ces résultats viennent également confirmer l'hypothèse de l'autochtonie de la couverture pédologique. L'analyse minéralogique montre également que l'horizon C correspond minéralogiquement à la molasse gréseuse décarbonatée.

Dans le cas du profil S12, il ne fut pas possible d'atteindre la roche mère. Toutefois, les observations sur le terrain ainsi que l'analyse granulométrique confirme qu'une composante morainique vient affecter le sol. L'analyse XRF a montré que les processus de décarbonatation et de lixiviation sont également des processus prédominants dans la pédogenèse des sols formés à partir de la moraine. GRATIER et BARDET (1980) ont, en effet, montré que la moraine du Plateau vaudois est toujours carbonatée.

En outre, les différences en éléments majeurs entre le profil S17 et les profils développés sur moraine sont faibles. Sachant que la moraine est composée

principalement de matériel molassique remanié et galets alpins, il paraît plausible que ce soit la composante molassique de la moraine qui ait le plus participé à la pédogenèse, les galets alpins étant moins facilement altérables.

Les analyses des éléments en traces ont permis de mettre en évidence une influence de la moraine sur la chimie des sols développés sur la colline de la Commounaille. On remarque notamment que les sols formés sur moraine sont plus riches en Zr et en Ti. Ceci peut être imputé une influence felsique plus prononcées. La moraine est effectivement riche en roches granitiques et gneissiques. Le couple Ba-K permet également de bien distinguer la population de sols formés sur moraine du profil développé sur molasse. Les éléments associés aux roches ultramafiques, tels que Ni et Cr, ne permettent pas de véritable distinction entre les deux populations. Mais l'on peut remarquer que le profil S17 est globalement enrichi en ces deux éléments, par rapport aux sols formés sur moraine. Cr et Ni proviennent donc vraisemblablement d'une même source et leur teneur dans le sol est probablement contrôlée par la composante molassique.

Le Pb présente dans certains horizons des valeurs élevées. Il s'agit dans les deux cas des horizons les plus superficiels. Cela semble indiquer que le plomb est d'origine anthropique. Des faibles teneurs dans la molasse gréseuse saine et le fait que Pb ne soit pas associé aux feldspaths semble le confirmer.

5 Étude des blocs erratiques

5.1 Données préexistantes

Les travaux effectués sur les blocs erratiques du plateau vaudois sont peu nombreux. Les notices explicatives qui accompagnent les cartes géologiques peuvent parfois fournir quelques informations, mais elles sont peu exhaustives. De façon générale, il ressort de ces ouvrages que les blocs erratiques du plateau ont été, depuis des siècles, activement exploités comme pierre à bâtir. Leur nombre actuel ne représente ainsi qu'une petite partie de leur répartition première. Seuls subsistent les blocs protégés, et ceux présents au fond des ravins ou au sein des zones boisées depuis longtemps. En outre, il ressort clairement que les roches erratiques trouvées dans les régions qui nous concernent sont originaires des Alpes et du Plateau.

La notice explicative de la carte géologique d'Yverdon-les-Bains, rédigée par JORDI (1994), ne donne aucune indication concernant la nature des blocs erratiques rencontrés sur le territoire cartographié.

La notice explicative de la feuille d'Échallens, rédigée par BERSIER (1953), indique que les lithologies les plus représentées sont les conglomérats siliceux et grès carbonifères et permien de Vallorcine et les conglomérats calcaires chattiens du Mont-Pèlerin.

GABUS (2000) indique dans la notice explicative de la feuille de Moudon que les blocs erratiques proviennent de toute la rive droite, vaudoise et valaisanne, de la vallée du Rhône pour le matériel cristallin et le sédimentaire. Les blocs rencontrés proviennent également du plateau. Parmi ceux-ci, ceux qui subsistent sont les Poudingues du Mont-Pèlerin, les blocs de molasse gréseuse ayant disparu par altération. Il souligne également la présence fréquente de roches violacées du Permien et de poudingues gris du Carbonifère.

La notice explicative de WEIDMANN (1996) concernant la feuille de Romont, signale que les blocs erratiques rencontrés sont, par ordre de fréquence, des Poudingues du Mont-Pèlerin, des Grès et Poudingues de Vallorcine, des gneiss et granites divers, des calcaires des Préalpes et de l'Helvétique, des grès du flysch. Il souligne aussi la présence de grès coquilliers de l'OMM en rive gauche de la Broye.

La notice de la carte géologique de Fribourg donne des informations plus précises concernant l'origine des blocs erratiques. D'après ses auteurs PYTHON et al. (1998), les blocs rencontrés sont des gneiss et migmatites qui proviennent du Massif des Aiguilles Rouges, des gneiss d'Arolla, des granites du Mont-Blanc et des granodiorites de Fully, des grès et conglomérats de Vallorcine, du Carbonifère supérieur et du Permien, des grès et des calcaires siliceux de l'Helvétique et, en prédominance, des conglomérats du Mont-Pèlerin. Ces données sont tirées du travail de BEHMER (1912) sur les blocs erratiques de la région de Fribourg.

WEIDMANN (1988) souligne dans la notice explicative de la carte géologique de Lausanne que les conglomérats de Vallorcine et les poudingues du Mont-Pèlerin sont surreprésentés, car impropres à la taille.

INGLIN (1960), dans sa thèse sur la molasse et le Quaternaire de la région de Romont, écrit que les blocs rencontrés sont, par ordre de fréquence décroissant, des poudingues du Mont-Pèlerin et du Gibloux, des poudingues de Vallorcine, des granites et protogines du Mont-Blanc, des gneiss et schistes cristallins, des calcaires, des brèches, des grès du flysch.

5.2 Différentes lithologies rencontrées dans le cadre de ce travail

Il s'agit ici tant de véritables blocs erratiques (diamètre supérieur à 20 cm) que de galets (taille supérieure à 5 cm), appartenant à la moraine würmienne. Le caractère « en place » ou in situ de chaque bloc ou galet a été vérifié avant l'échantillonnage. Seuls les blocs clairement in situ, qui n'ont donc pas été importés par l'homme, ont été échantillonnés. Il s'agit par exemple de galets récoltés entre les racines d'une souche renversée, ou d'un bloc de plus d'un mètre de diamètre enfoui au trois quart dans le sol, au sein de la forêt. L'échantillonnage a été effectué sur toute la surface du massif de la Commounaille et dans la forêt qui se situe sur les flancs du Mont Vusery, au sud-ouest de la Commounaille.

Les lithologies rencontrées sont très diverses. On trouve notamment divers granitoïdes et divers gneiss, des grès siliceux gris, des quartzites, etc. (voir tableau 5.1). Un bloc de taille particulièrement importante a été exhumé lors du creusement des fondations de la tour de bois (le Donjon) qui s'élève au nord-est du massif de la Commounaille. Il se trouve désormais à l'entrée du chemin qui mène au Donjon, à quelques pas du parking. Ce bloc est un conglomérat à galets calcaires de 6 cm de diamètre en moyenne et à matrice sableuse. Il se pourrait donc bien s'agir d'un bloc de conglomérat du Mont-Pèlerin.

Échantillons	Description
BDB-2	grès coquiller de l'OMM
BDB-3, -8 et -28	monzo à syénogranites à muscovite : granite de Vallorcine
BDB-13	granite
BDB-22	granite mylonitique à biotite et rutile sagénite (peut-être un faciès mylonitisé du granite du Mont-Blanc)
BDB-14 et -24	gneiss rubanés à biotite et grenat
BDB-18	gneiss oeilé à biotite
BDB-20	gneiss oeilé à muscovite et grenat
BDB-15 et -21	monzogranites à biotite verte et allanite : granite du Mont-Blanc
BDB-28 b)	quartzite (quartz plus un peu de muscovite)
BDB-27 a) et -27b)	schistes quartzitiques à chlorite et muscovite
BDB-12, -16 et -30	grès siliceux gris

Tableau 5.1 : Lithologies rencontrées dans la région de Thierrens.

5.3 Les granites

Pour tenter de trouver une origine possible à cet ensemble de roches erratiques j'ai décidé d'utiliser les roches granitiques. Parmi les roches erratiques rencontrées dans la région de la Commounaille, on peut notamment reconnaître deux types de granites distincts. Le premier le représenté par un beau granite à biotite et mica blanc, et à phénocristaux de feldspath alcalins. Trois échantillons récoltés (BDB-3, -8 et -28) correspondent macroscopiquement et microscopiquement à ce type de granite. Ils ont été trouvés à des endroits très différents du massif forestier. Le deuxième type est un granite à grains plus grossier, présentant une foliation et comportant de la biotite verte pour unique minéral mafique. Deux échantillons correspondant à ce faciès ont été récoltés (BDB-15 et BDB-21). Le premier type pourrait correspondre à un morceau de granite de Vallorcine très peu déformé. Le deuxième type correspond au granite du Mont-Blanc. Ces deux informations m'ont été données dans un premier temps oralement par le Dr. François BUSSY (Institut de minéralogie et géochimie, Université de Lausanne), en se basant sur les aspects macroscopiques et microscopiques des échantillons. Les points suivants de ce chapitre tentent de vérifier ces deux hypothèses, par des comparaisons pétrographiques et des comparaisons de typologie de zircon.

5.3.1 Granite de Vallorcine

- **Pétrographie et généralités sur le granite de Vallorcine**

Le granite de Vallorcine fait partie du massif des Aiguilles Rouges. Il est constitué d'un étroit corps granitique qui s'étend de Miéville (sur la rive gauche de la vallée du Rhône), en direction du sud-ouest, sur environ 15 km. Le granite de Vallorcine fait

partie des intrusions hyperalumineuses tardi-varisques qui intrudèrent le socle pré-varisque des massifs des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc, vers 307 Ma. L'intrusion de Vallorcine est un granite de type S, comme le confirme la typologie des zircons, l'analyse des isotopes stables et la présence de minéraux riches en Al, tels que la cordiérite et muscovite (BRÄNDLEIN et al. 1994). D'après BRÄNDLEIN et al. (1994), le faciès le plus abondant est un granite porphyrique dont les constituants majeurs sont K-feldspaths (orthoclase, microcline), plagioclases, quartz, biotite et muscovite.

- **Pétrographie des échantillons correspondant à ce faciès (BDB-3, -8 et -28)**

Les trois échantillons sont composés de 40% de quartz, qui forme des plages composées de grains recristallisés. Les K-feldspaths représentent 25 à 28% de la roche, selon l'échantillon. Ils se trouvent sous forme de phénocristaux subautomorphes de taille maximum de 3 cm, mais également sous forme de cristaux xénomorphes qui forme la matrice. Les phénocristaux présentent souvent des textures d'exsolution (perthites), et des macles de Carlsbad. Certains cristaux présentent également des macles caractéristiques du microcline. Les plagioclases représentent 12 à 20% de la roche. Leur composition varie entre An₁₅₋₂₆ (oligoclase). Les cristaux de plagioclases sont présents en tant que phénocristaux subautomorphes et en tant que cristaux xénomorphes dans la matrice. Les phénocristaux de K-feldspaths et de plagioclases sont parfois zonés. Très souvent, ils sont altérés. Les micas présents sont la biotite et la muscovite. La roche est composée de 10 % de biotite brun-rougeâtre. Elle est légèrement chloritisée dans un des trois échantillons. Le pourcentage de muscovite varie entre 5 et 10%.



Figure 5.1 : Échantillons BDB-3.

- **Typologie des zircons**

Selon BRÄNDLEIN et al. (1994), la typologie des zircons du granite de Vallorcine montre que les roches qui le composent suivent la tendance caractéristique du refroidissement des magmas anatectiques intrusifs et hyperalumineux. Les zircons des trois échantillons récoltés à Thierrens présenteront vraisemblablement également cette typologie typique des zircons de granites hyperalumineux. Toutefois, cette typologie n'est en aucun cas une caractéristique discriminante du granite de Vallorcine

En conclusion, la typologie des zircons ne nous viendra pas en aide pour certifier la filiation de ces échantillons avec le granite de Vallorcine, car elle n'est pas discriminante.

- **Conclusion**

La pétrographie de ces trois échantillons de roches erratiques les classe dans les monzogranites à syénogranites, à caractère hyperalumineux (présence de muscovite). Les caractéristiques pétrographiques de ces échantillons concordent avec les détails donnés par BRÄNDLEIN et al. (1994) sur le granite de Vallorcine. Sur la base de l'analyse pétrographique, on peut donc supposer que ces trois roches erratiques proviennent du granite de Vallorcine dans le Massif des Aiguilles Rouges.

5.3.2 Granite du Mont-Blanc

- **Pétrographie et généralités sur le granite du Mont-Blanc**

Le granite du Mont-Blanc est un granite intrusif tardi-varisque. Il fait partie du massif cristallin du Mont-Blanc, célèbre pour son sommet le plus haut des Alpes, culminant à 4'810 m. Le massif du Mont-Blanc fait face au massif des Aiguilles Rouges, séparés par la Vallée de Chamonix. Tous deux appartiennent aux massifs cristallins externes de l'arc alpin. Le massif du Mont-Blanc est limité par la vallée du Rhône au nord-est, par la vallée de l'Arve le long de sa bordure nord-ouest et par le Val Ferret à l'est.

Le massif est constitué de lithologies variées telles que des schistes cristallins et des gneiss, dans lesquels a intrudé le granite du Mont-Blanc (BUSSY 1990). Sa bordure orientale est composée de Rhyolites.

La pétrographie du granite du Mont-Blanc, établie par BUSSY (1990), décrit un granite de type monzo- à syénogranite à biotite. Cette biotite a la particularité d'avoir généralement perdu sa teinte brune, pour être remplacée par une teinte verte. Ce phénomène, imputé au métamorphisme alpin, est dû à une perte de Ti dans les biotites, remplacé par Fe (BUSSY 1990). Ces biotites vertes contiennent de nombreuses aiguilles de rutile maclé sagénite. L'allanite (variété d'épidote) est un minéral accessoire important.

La texture originelle du granite du Mont-Blanc est rarement visible et la roche présente généralement une schistosité fruste. Avec l'augmentation de la déformation, elle peut aller jusqu'à un stade de mylonitoschiste oillé (BUSSY 1990).

- **Pétrographie des échantillons correspondant à ce faciès (BDB-15 et -21)**

Le quartz représente environ 40% de la roche et se distribue en plages composées de grains recristallisés. Les plagioclases représentent 15 à 25% de la roche, selon l'échantillon. Ils présentent toujours des macles polysynthétiques et sont parfois maclés selon la loi de Carlsbad. Les feldspaths alcalins peuvent représenter 30 à 40% de la roche. Ils présentent très fréquemment des textures d'exsolution (perthites), des macles de Carlsbad et des macles du microcline. La concentration de biotite atteint environ 5% dans les deux échantillons. Une petite quantité de biotite a gardé une teinte brune, mais la majeure partie est verte. Certaines faces {001} de ces biotites vertes contiennent des aiguilles de rutile sagénite qui se coupent à environ 120°. De l'épidote est visible, généralement dans les fissures des feldspaths. L'allanite est également un minéral accessoire qui apparaît dans les deux échantillons, à raison de deux à trois individus. Elle se présente sous forme de prismes de 0,2 à 2 mm de longueur avec un pléochroïsme dans les brun-jaune à rouge très foncé.

L'aspect macroscopique et l'étude des lames minces montrent que la roche a subi une déformation. Le quartz forme des plages composées de sous-grains, les feldspaths, ainsi que l'allanite sont parfois fragmentés. Il faut ajouter que les échantillons étudiés contiennent tout deux des enclaves microgrenues.



Figure 5.2 : Échantillon BDB-15.

- **Typologie des zircons**

BUSSY (1990) présente des analyses de zircons selon la méthode typologique de PUPIN (1976), pour deux échantillons du granite du Mont-Blanc. L'un provient du faciès central et l'autre du faciès de bordure. Les deux populations, très semblables, sont caractérisées par une prépondérance du prisme {100} et de la pyramide {101}, c'est-à-dire, des types de zircons P₄ et P₅. Cette association typologique se rencontre dans les granites alcali-calciques (subalcalins) ferro-potassiques (BUSSY 1990).

J'ai réalisé une analyse typologique sur une population de 66 zircons (c.f. figures 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6), appartenant à un des blocs erratiques de Thierrens supposés provenir du massif du Mont-Blanc (échantillons BDB-15). On remarque une forte prédominance des types P₅ et P₄ définis par PUPIN (1976), c'est-à-dire des zircons à deux prismes, {100} et {110}, et une pyramide, {101}. Les types P₄ et P₅ sont caractérisés par un développement prononcé des faces {100} au détriment des faces {110}. Les types P₁, P₂ et P₃ sont également présents au sein de la population, mais à beaucoup plus faible pourcentage. Sur un petit nombre d'individu semble apparaître des pyramides {211}, ce qui les classe dans les types S₂₀ ou S₂₅. Toutefois, ces cas sont rares.

- **Conclusions**

Après croisement de ces différentes informations, placer l'origine des échantillons de roches erratiques granitiques BDB-15 et BDB-21 dans le massif du Mont-Blanc semble être une hypothèse crédible. Premièrement, les blocs erratiques d'origine du massif du Mont-Blanc sont communs sur le Plateau suisse, comme en atteste la littérature à ce sujet (BEHMER 1912, PYTHON et al. 1998). La pétrographie joue également en faveur d'une telle hypothèse. Certaines caractéristiques sont assez probantes, notamment la présence d'allanite et de biotite verte. L'analyse typologique des zircons sur les échantillons récoltés dans la région de Thierrens donne des résultats très semblables à ceux obtenus par BUSSY (1990) sur le granite du Mont-Blanc.

Il est à noter que le granite du massif de l'Aar est caractérisé par une composition minéralogique et une typologie des zircons similaires à celle du granite du Mont-Blanc. La littérature sur les blocs erratiques ne mentionne pas la présence de blocs du granite de l'Aar. Est-ce par qu'il n'en existe effectivement pas, où sont-ils confondus avec le granite du Mont-Blanc ? Pour compléter cette étude, il serait nécessaire de vérifier s'il existe un moyen d'exclure la possibilité d'une origine dans le massif de l'Aar. Des analyses isotopiques permettraient peut-être de le faire. Le granite du Mont-Blanc est cinq millions d'années plus jeune que le granite du Massif de l'Aar. Une datation ultraprécise des zircons extraits de l'échantillon de bloc erratique trouvé à Thierrens permettrait donc de trancher.

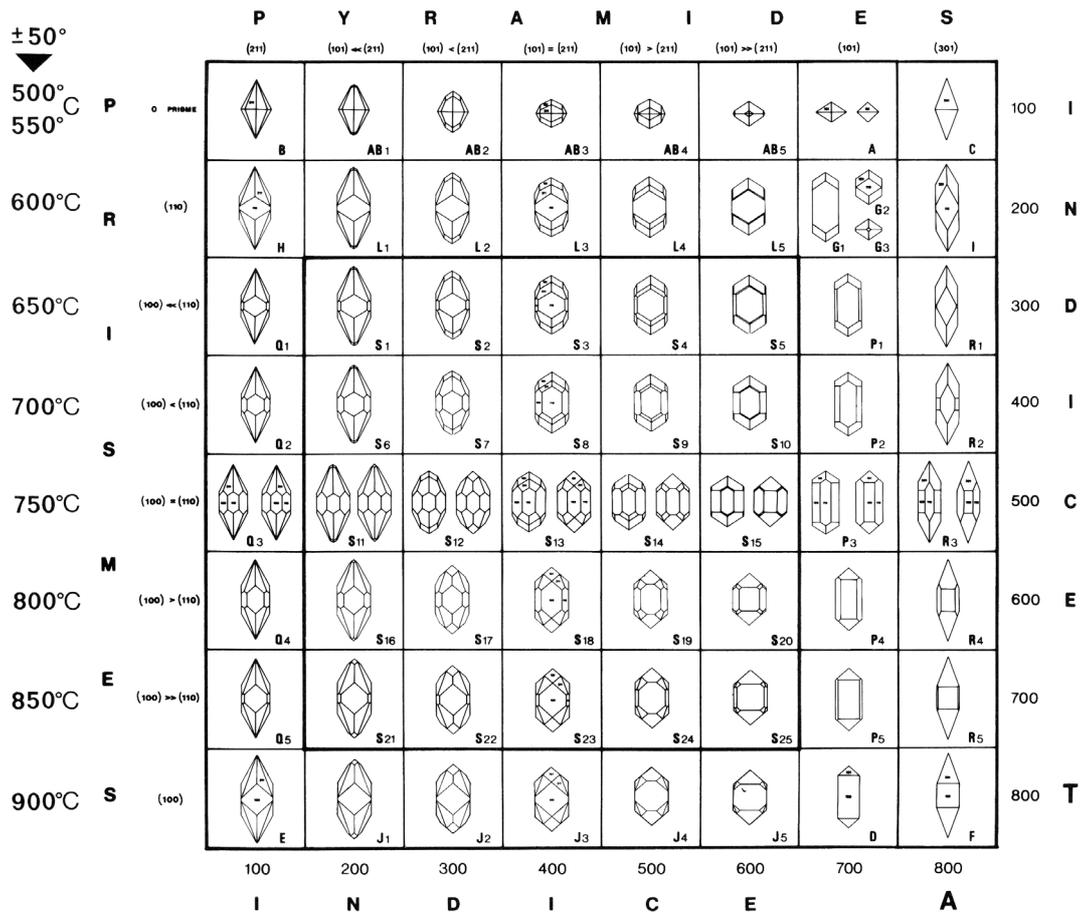


Figure 5.3 : Principaux types et sous-types de la classification typologique des zircons (tiré de PUPIN 1980).

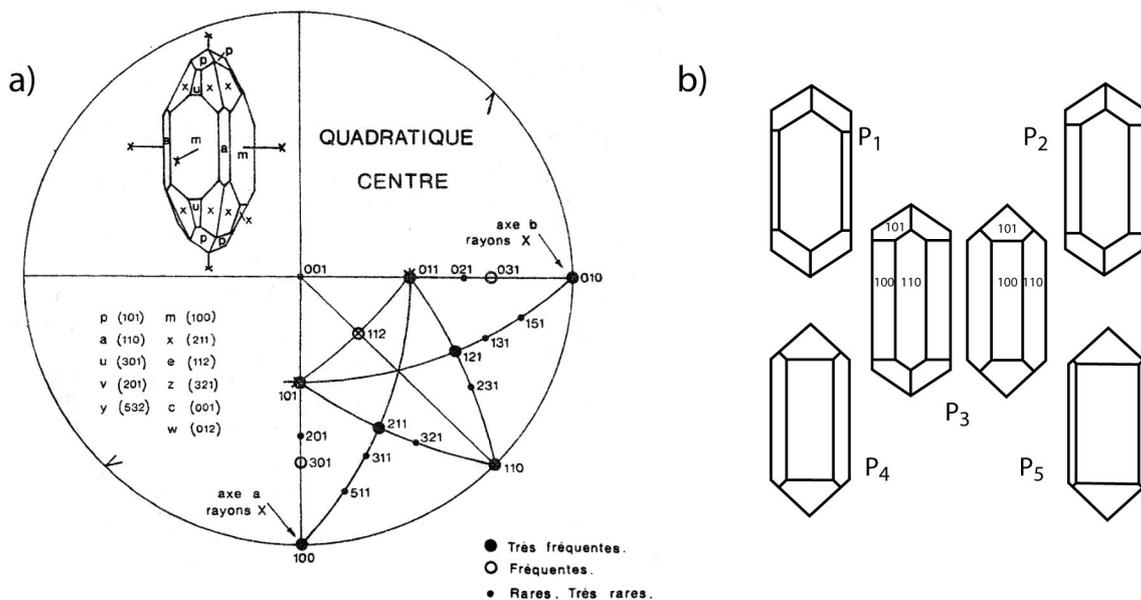


Figure 5.4 : a) Projection cristallographique des principales faces des cristaux de zircons naturels (PUPIN 1976). b) Principaux types rencontrés dans l'échantillon BDB-15. Ils sont tous composés d'une pyramide $\{101\}$ et de deux prismes $\{100\}$ et $\{110\}$. Le type P_5 est le plus représenté. Il est caractérisé par un prisme $\{100\}$ nettement plus prononcé que $\{110\}$ (modifié d'après PUPIN 1976).

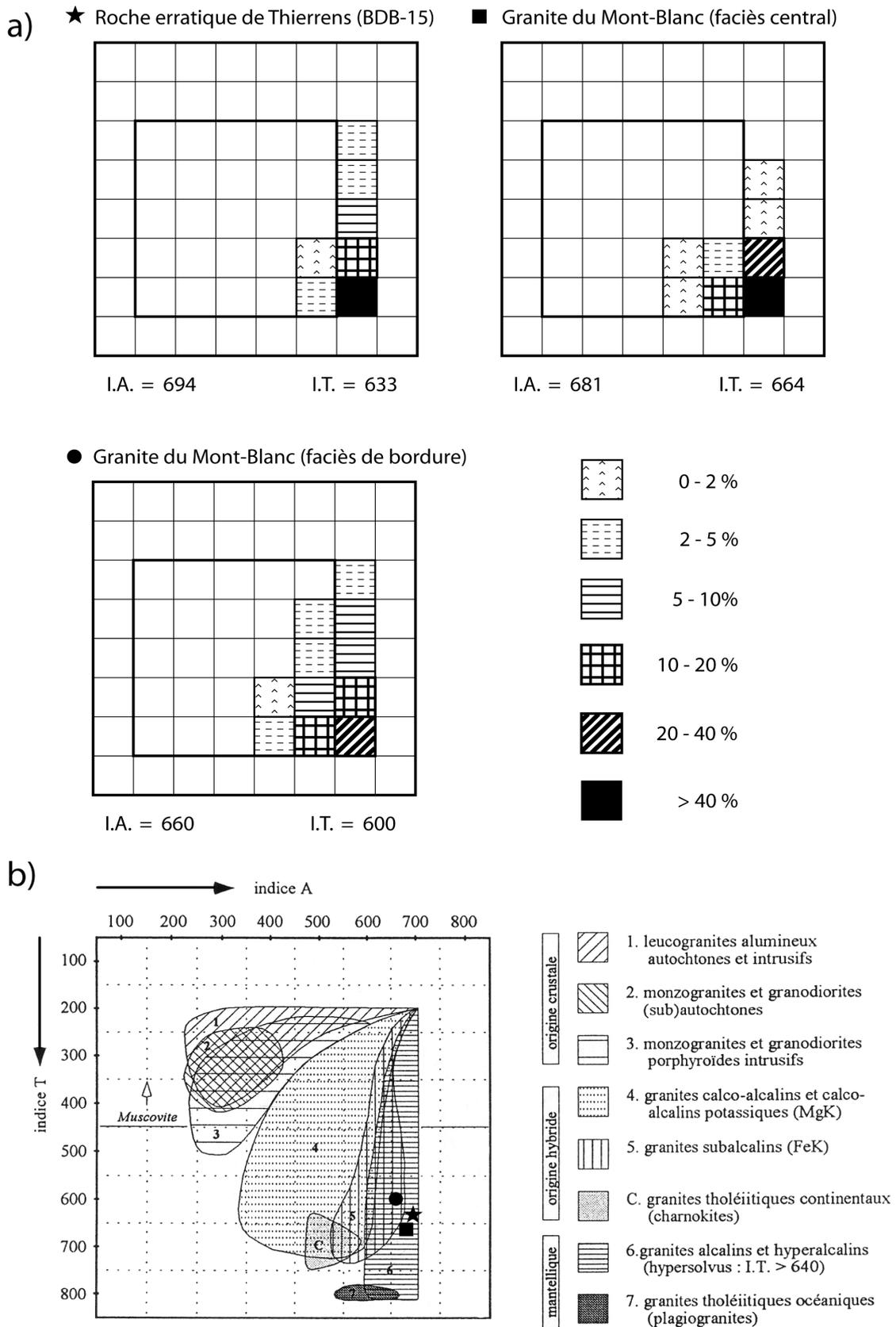


Figure 5.5 : a) Classification typologique des zircons selon PUPIN (1976 et 1980). Les données sur le faciès central et le faciès de bordure du granite du Mont-Blanc ont été tirées de BUSSY (1990). b) Champs de répartition des indices typologiques moyens (I.A. et I.T.) des principaux ensembles granitiques (PUPIN 1988). Les points moyens de l'échantillon de roche erratique de Thierrens et des deux faciès du granite du Mont-Blanc ont été reportés sur ce graphique.

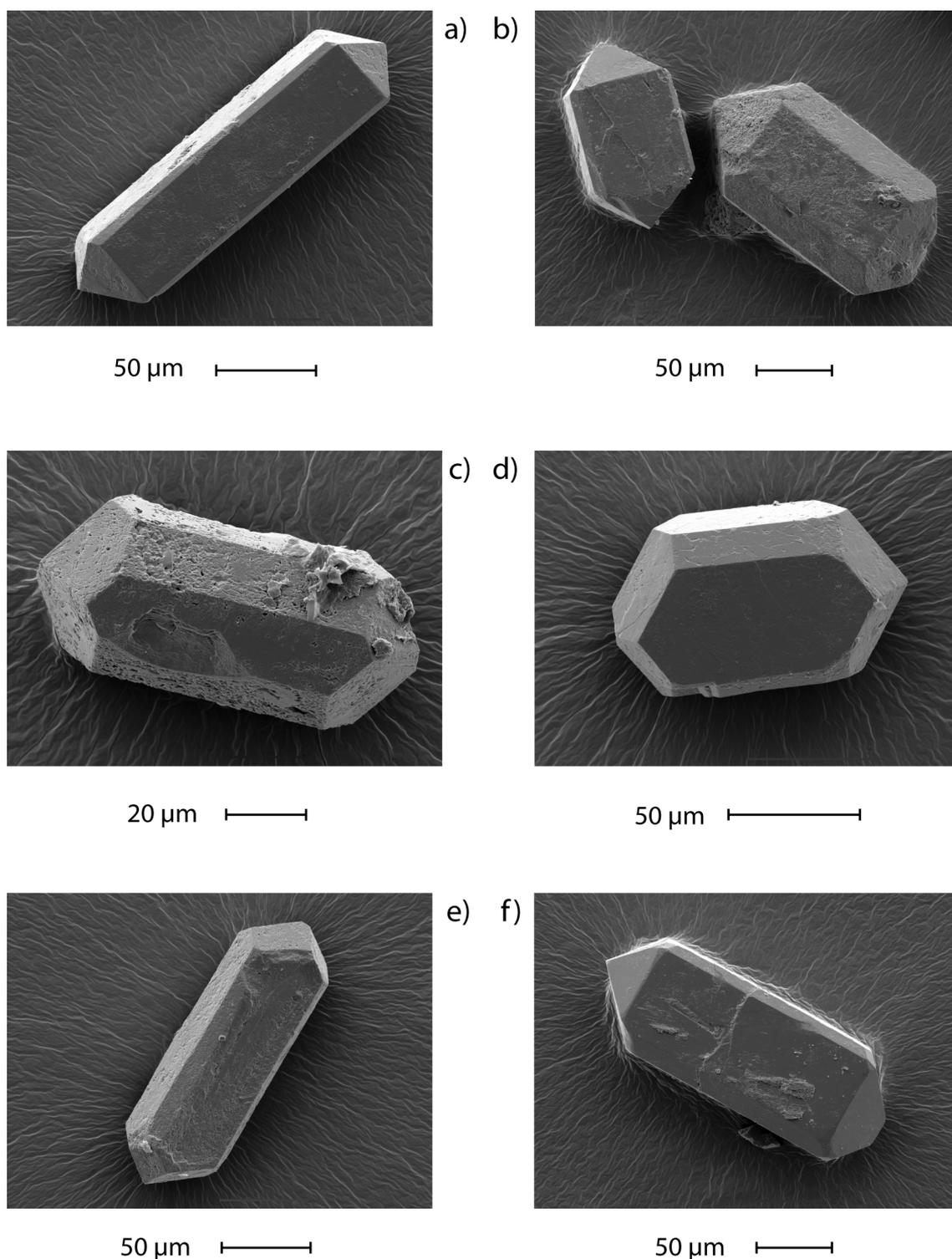


Figure 5.6 : Principales formes de zircons rencontrées dans l'échantillon BDB-15. Images obtenues grâce au microscope électronique à balayage. a) type P_5 , les faces $\{100\}$ sont nettement plus larges que les faces $\{110\}$. b) à gauche, type P_5 , à droite type P_4 . Les faces $\{110\}$ sont à peu près deux fois moins larges que les faces 100. c) type P_3 , les faces $\{100\}$ et $\{110\}$ sont d'égale largeur. d) type P_1 , les faces $\{110\}$ sont nettement plus larges que les faces $\{100\}$. e) autre type P_1 . f) on voit peut-être l'apparition de pyramides $\{211\}$. On a donc ici un minéral de type S_{25} .

5.4 Conclusions finales sur les blocs erratiques

L'étude des blocs erratiques de la région de Thierrens a montré que les lithologies rencontrées sont très variées. On trouve notamment divers granitoïdes, gneiss, grès siliceux gris, quartzites, d'origines des alpes, mais également des blocs originaires du Plateau (poudingues du Mont-Pèlerin et grès coquilliers).

Dans cette étude, il a été choisi d'utiliser les granites pour tenter de trouver une origine à cet ensemble de roches erratiques. Une origine pour deux types de granite a pu être proposée. Sur la base de critère pétrographique, il apparaît que le premier type correspond un morceau du granite de Vallorcine et trouverait donc son origine dans le massif des Aiguilles Rouges. Le deuxième type pourrait être un morceau de granite du Mont-Blanc. Des évidences minéralogiques, mais également une grande similitude dans la typologie des zircons permettent de faire cette hypothèse. Le granite du massif de l'Aar présente également une typologie similaire. Cette étude propose le massif du Mont-Blanc comme origine, mais elle ne permet pas d'exclure le massif de l'Aar comme source potentielle pour ces échantillons de granites erratiques. Il serait nécessaire de faire des analyses supplémentaires pour certifier l'hypothèse du Mont-Blanc, des analyses isotopiques ou la datation des zircons, par exemple.

Pour compléter ce travail, il serait également important de chercher une origine aux autres lithologies rencontrées, qui n'ont été que brièvement décrites dans cette étude. Pour la plupart, elles pourraient également trouver une origine dans les massifs des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc. Caractériser la source des autres roches erratiques, les gneiss par exemple, permettrait peut-être de voir si l'origine semble bien se trouver dans la zone des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, ou s'il existe également des roches qui viennent du massif de l'Aar.

6 Conclusions de la partie scientifique et perspectives

6.1 Étude des sols

L'étude granulométrique, chimique et minéralogique des sols de la région de Thierrens a prouvé l'autochtonie de la couverture pédologique. Le sol s'est donc développé essentiellement par l'altération de la roche sous-jacente.

L'analyse des éléments majeurs a montré que la décarbonatation et la lixiviation des éléments solubles sont deux processus prépondérant au cours de la pédogenèse.

Les différences en éléments majeurs entre le profil S17 et les profils développés sur moraine sont faibles. Sachant que la moraine est composée principalement de matériel molassique remanié et galets alpins, il semble que ce soit la composante molassique de la moraine qui ait le plus participé à la pédogenèse, les galets alpins étant moins facilement altérables.

En utilisant la composition en éléments en traces, il semble possible de faire une distinction entre les sols formés sur molasse et ceux formés sur moraine. Pour confirmer ce point, il serait nécessaire de faire des analyses sur un plus grand nombre de profils formés sur molasse. Cela permettrait de vérifier si effectivement ces valeurs s'ajoutent à celles du profil S17 pour former une population distincte de celle qui englobe les sols formés au sein de la forêt de la Commounaille.

Il serait également nécessaire de faire des analyses sur plusieurs échantillons de molasse gréseuse dans le but de tester son homogénéité granulométrique, chimique et minéralogique. Cela permettrait de voir s'il est possible d'utiliser des calculs iso-quartz ou iso-zirconium.

L'analyse granulométrique a posé un problème au niveau de la compilation des résultats obtenus par granulométrie laser et ceux obtenus par pesées. Le manque de temps ne m'a pas permis de trouver de solution et j'ai décidé d'utiliser les deux résultats séparément. Toutefois, une analyse granulométrique complète, de 0,3 μm à 2 mm, aurait été importante. Une solution pourrait être d'effectuer l'analyse granulométrique avec un appareil laser qui permette de mesurer les fractions jusqu'à 2 mm.

6.2 Études des blocs erratiques

L'étude des roches erratiques a permis de faire une hypothèse sur l'origine de deux granites échantillonnés dans la région de Thierrens. Sur des critères pétrographiques, on peut supposer l'un des deux granites et un morceau de granite de Vallorcine. Il trouve donc son origine dans le massif des Aiguilles Rouges. Le deuxième type de granite est supposé être un morceau de granite du Mont-Blanc. Des évidences pétrographiques, mais également l'analyse typologique des zircons permettent de considérer cette hypothèse comme plausible. Pour soutenir cette hypothèse, des analyses isotopiques

pourraient être faites. En effet, un massif granitique issu d'un même magma va présenter une signature isotopique homogène, mais très vraisemblablement différente d'un autre massif. Cela permettrait sans doute de caractériser avec plus d'assurance la source probable de ces blocs erratiques. La datation des zircons extraits de l'échantillon de granite recolté à Thierrens fournirait également une information précieuse. Au point où en est cette étude, on ne peut pas d'exclure la possibilité que ces morceaux de granite, supposés être originaire du massif du Mont-Blanc, proviennent du massif de l'Aar.

Pour compléter ce travail, il serait également nécessaire de chercher une origine aux autres lithologies rencontrées, qui n'ont été que brièvement décrites ici. Pour la plupart, elles pourraient également trouver une origine dans les massifs des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc.

7 Création d'un sentier didactique

7.1 Introduction

Ce chapitre porte sur le troisième et dernier volet de ce travail de Master : la création d'un sentier didactique. En effectuant ce travail, j'ai réalisé que la vulgarisation était une tâche difficile. C'est vraisemblablement dans cette partie du travail de Master que j'ai dû le plus m'investir, pour maintenir une certaine rigueur scientifique tout en rendant la lecture des panneaux agréable et facile, sans être simpliste.

Toute science utilise un vocabulaire qui lui est propre. La géologie n'y échappe pas, avec beaucoup de mots issus directement de l'anglais, ou des termes français qui ne se trouvent dans aucun dictionnaire (mis à part un dictionnaire de géologie). Toute personne, enfants comme adultes, qui désire s'initier à la géologie, ou à toute autre spécialité, doit passer par l'apprentissage d'un vocabulaire inconnu, ou mal maîtriser. De plus, des mots utilisés dans le langage courant prennent un sens différent et bien précis mis dans un contexte scientifique. Tout ceci induit une confusion chez la personne non habituée qui, si elle comprend le mot, ne comprendra pas encore la phrase. Cette confusion ne s'atténuera qu'avec le temps et la pratique, jusqu'à ce que le mot prenne automatiquement dans l'esprit le sens qui lui incombe.

L'analogie avec l'apprentissage d'une nouvelle langue est intéressante. Le novice aura de la peine à s'exprimer et à comprendre, car il devra toujours mentalement passer par une traduction du mot étranger dans sa propre langue. Ce phénomène sera la cause de son manque de spontanéité et de son besoin d'entendre plusieurs fois la même phrase, pour lui permettre d'avoir le temps de traduire chaque mot. Avec le temps et surtout la répétition, de plus en plus de mots seront compris et assimilés à un niveau proche de la source de la réflexion, rendant la traduction inutile. La langue sera complètement assimilée lorsqu'il sera possible à la personne de parler, comprendre et même de réfléchir dans la langue autrefois étrangère, sans plus avoir recours à la traduction mentale dans sa langue maternelle. Il est vraisemblablement impossible de savoir quel est le processus qui fait qu'un mot inconnu est finalement acquis et utilisable spontanément dans une discussion. Néanmoins, il semble que ce processus ne puisse se passer de l'expérience.

Le vulgarisateur se trouve donc face à un public qui ne maîtrise pas le même vocabulaire et, surtout, qui n'a pas le temps de l'apprendre, d'en faire l'expérience. Il lui faudra donc se faire traducteur et permettre la transmission de son savoir sans faire du lecteur un spécialiste. Et ce dernier point me semble particulièrement important. Le vulgarisateur n'a pas pour mission de faire du lecteur un spécialiste, mais de lui transmettre l'essentiel du sujet, de lui donner une base, une saveur, qui lui permettra et lui donnera peut-être l'envie d'aller plus loin, plus tard. En fin de compte, le vocabulaire spécifique et les concepts scientifiques sont outils indispensables au spécialiste, mais encombrant pour le non-initié. Là se trouve peut-être la plus grande difficulté du

vulgarisateur : définir qu'est-ce que l'essentiel dans ce qu'il veut transmettre et ne pas le noyer dans un flot d'informations que lui seul maîtrise.

En conclusion, c'est dans la simplification des concepts, le recours à des analogies et à des exemples concrets, en faisant appel aux connaissances préalables du lecteur et en traduisant les mots spécifiques en mots courants que le vulgarisateur mènera sa tâche à bien.

7.2 Création d'un sentier didactique à Thierrens

7.2.1 *Nature du travail*

Le Bois des Brigands (massif forstier de la Commounaille) est une petite forêt située à 1 km au sud de Thierrens. L'association du Bois des Brigands y a aménagé deux sentiers didactiques sur les thèmes des arbres, des fourmis et des animaux de la région. Mandaté par l'association, mon travail aura été de réaliser un troisième sentier, sur le thème la géologie de Thierrens. La seule condition imposée était de réaliser ces panneaux pour des enfants d'environ douze ans, principaux lecteurs potentiels, venus lors de courses d'école. Je me suis donc attaché à cette condition, tout en gardant à l'esprit que les enfants ne seront pas les seuls lecteurs de ces panneaux, mais bien évidemment leurs enseignants, leurs parents, et les nombreux autres promeneurs, de tous âges, venus chercher le calme de la forêt.

Les deux premiers sentiers ont été créés dans le but d'inviter le lecteur à se fondre dans l'écosystème de la forêt par le jeu et l'utilisation de nos différents sens. Le travail décrit ici a été réalisé en essayant de garder cet état d'esprit.

Les deux premiers sentiers ont été réalisés par Nikola ZARIC. Ingénieur forestier, mais également diplômé de l'école supérieure des Beaux-Arts de Genève, ZARIC a le profil parfait pour réaliser de tels panneaux de vulgarisation sur la forêt. Son travail pour le Bois des Brigands m'a plu et j'ai décidé de faire appel à lui pour la réalisation des illustrations qui accompagneront mes textes. Bien que je l'aie contacté une fois les textes quasiment terminés, notre collaboration et son expérience dans le domaine de la vulgarisation m'ont été très enrichissante et m'ont permis de modifier et d'améliorer mon travail.

Les dix-neuf panneaux (voir annexe J) sont terminés et imprimés. Ils seront posés le long du sentier au printemps 2009 et l'inauguration aura lieu en juin de la même année.

7.2.2 *Les particularités du lieu*

Le lieu présente certaines particularités dont il a fallu tenir compte. La principale est vraisemblablement l'absence totale d'affleurement. Il n'est pas possible de montrer directement des faits géologiques sur place, et il faudra ainsi jouer avec le potentiel imaginaire du lecteur. Le massif jouit par contre d'une vue magnifique sur les Alpes,

notamment depuis le haut du « Donjon », tour qui s'élève à seize mètres au-dessus du sol et qui se trouve sur le chemin de ce sentier didactique. Si l'on se déplace à la lisière nord-ouest du bois, le Jura et notamment le Chasseron (1607 m) s'offre à nous.

7.2.3 De quoi parler ?

Pour réaliser un travail comme celui-ci, c'est une des premières questions à se poser. De quoi parler, ou commence l'histoire géologique de Thierrens ? Évidemment, la Molasse nous vient tout de suite à l'esprit, et ce sera l'un des principaux sujets à traiter. Toutefois, il semble clair que la région a plus à nous apporter. Une excursion sur le terrain suffit à s'en convaincre rapidement.

La vue sur les Alpes nous donne un très bon prétexte pour se pencher sur leur histoire et leur nature. De plus, l'explication de leur formation et de leur érosion est une introduction indispensable à l'histoire de la molasse. Il semble donc que pour raconter l'histoire géologique du « Bois des Brigands », il soit nécessaire de remonter au moins à la naissance des Alpes. C'est ce qui a été fait. J'ai décidé de faire commencer l'histoire de la région, il y a 160 millions d'années, au Jurassique. À cette époque, les Alpes n'existent pas encore, mais leur naissance est en gestation. Premièrement, les roches sédimentaires qui constituent aujourd'hui les Alpes se déposent dans la Téthys. Deuxièmement, l'océan, encore en extension à cette époque, va commencer à se refermer vers 120 millions d'années et créer une collision entre l'Apulie, morceau du continent africain et une partie de l'Europe. Cette collision va donner naissance aux Alpes. Deux panneaux traitent de ces sujets. Le premier propose une reconstruction paléogéographique des continents il y a 160 millions d'années. Le deuxième explique comment la collision entre l'Europe et l'Afrique, il y a 50 millions d'années, a créé les Alpes. Inspiré du livre *Le Cervin est-il africain ?* de Michel MARTHALER, ce panneau explique que le Cervin est effectivement un témoin de cette collision et que sa partie supérieure se compose de roches autrefois africaines.

La vue sur les Alpes rappelle un paradoxe peut-être devenu flagrant pour le géologue, mais généralement difficile à comprendre pour un néophyte. Il s'agit du fait que la structure des Alpes ne correspond généralement pas à leur forme. Si la structure des Alpes a été engendrée par les déformations tectoniques lors de la collision, la forme actuelle des Alpes est le fruit de l'érosion, travail des glaciers et des rivières. Un panneau sur l'érosion et la sculpture des Alpes a donc été réalisé, pour mettre en garde le lecteur face à ce paradoxe. Ce panneau sert également de transition avec l'histoire molassique, puisque l'érosion des Alpes crée beaucoup de déchets : la molasse.

L'histoire de la Molasse est une invitation à se plonger dans un passé aussi passionnant que spectaculaire et à se fondre dans les anciens paysages de la région, si différents du paysage actuel. Deux panneaux ont été créés à ce propos. Le premier décrit le paysage de la région à l'époque de la molasse d'eau douce inférieure, il y a environ 30 millions d'années. Je me suis inspiré de la fameuse gravure de Oswald Heer (voir annexe H) qui décrit admirablement le paysage de cette période. À cette époque, la

région de Thierrens est occupée par vaste plaine alluviale et marécageuse où serpentent de grandes rivières, descendues des Alpes. Tout est différent d'aujourd'hui. Le climat est tropical, les animaux sont des crocodiles, des tortues, des rhinocéros, les arbres sont des palmiers, des figuiers et des lauriers. Le deuxième panneau décrit le paysage de la molasse marine supérieure, il y a 20 millions d'années, à nouveau très différent et spectaculaire. À cette époque, la région de Thierrens se trouve sous la mer. Le climat est chaud, les eaux également et des requins y vivent.

La molasse invite à parler de paysages passés, mais il est également intéressant de parler des roches qui la composent. Un panneau se penche sur le passage du sable, qui est produit par l'érosion des Alpes et qui s'accumule dans le mer molassique, à la roche : la molasse marine. Un deuxième panneau traite quant à lui d'un aspect plus pratique, la molasse comme pierre de construction. En effet, de nombreux bâtiments anciens de Thierrens sont en partie construits avec la molasse de la région.

La vue sur les Alpes est superbe depuis le Bois des Brigands, mais la vue sur le Jura l'est également. Il m'a semblé intéressant et nécessaire de d'y dédier un panneau.

En se promenant dans le Bois des Brigands, on ne peut apercevoir aucun affleurement. Il semble, au premier abord, que la géologie y soit invisible, masqué par la végétation. Puis soudainement, on tombe sur un bloc de gneiss, puis un bloc de granite. En observant plus finement, on remarque qu'une grande diversité de roches parsème la forêt. Des roches qui n'ont souvent rien à voir avec la molasse. On découvre alors un nouveau chapitre de l'histoire géologique de Thierrens : les périodes glaciaires du Quaternaire. Un panneau est dédié à cette époque et dépeint un paysage à nouveau spectaculaire. Il y a 20'000 ans, la glace a envahi tout le Plateau suisse et Thierrens se trouve sous 500 mètres de glace.

Le panneau suivant décrit le retrait glaciaire dû à un réchauffement du climat, il y a environ 15'000 ans. Il suggère également que l'on peut apprendre du passé pour faire des hypothèses sur le futur. Si le réchauffement climatique d'il y a 15'000 ans a été capable de faire fondre les immenses glaciers qui occupaient la région, il est vraisemblable que le réchauffement climatique que nous vivons actuellement fera fortement reculer les glaciers actuels, nettement plus modestes que ceux du Pléistocène (il y a 20'000 ans). Ce panneau permet également une bonne transition avec les panneaux suivants. D'une part, il permet d'expliquer les dépôts glaciaires qui recouvrent la molasse du Plateau suisse et, d'autre part, il permet de faire le lien avec le prochain chapitre de l'histoire géologique de Thierrens : la formation du sol.

Deux panneaux sont dédiés aux dépôts glaciaires. Le premier explique comment le glacier dépose le bagage qu'il porte sur son dos, lorsqu'il se retire et crée ainsi des moraines. Ces dépôts sont les blocs et galets de gneiss, granites et autres roches alpines que nous avons découvert plus tôt, parsemant le Bois des Brigands. La nature de la colline de la Commounaille fut mentionnée dans le chapitre sur la géologie et la pédologie de Thierrens (chapitre 2). Nous sommes arrivés à la conclusion que si une influence morainique était indéniable, il restait impossible de savoir si la colline était un véritable drumlin composé uniquement de moraine, ou s'il s'agissait d'une butte à coeur

molassique. Pour ce travail de vulgarisation, j'ai décidé de considérer la colline du Bois des Brigands comme un vrai drumlin, dans un but de simplification. Le panneau sur les moraines explique donc aussi que la colline du Bois des Brigands est une butte composée de moraine que le glacier a sculpté dans le sens de son écoulement. Le deuxième panneau qui traite des dépôts glaciaires se penche sur l'histoire des blocs erratiques. Il tente de clarifier un aspect géologique du Plateau suisse souvent connu des gens. Dans ce cas, il fût possible de montrer les faits géologiques directement sur le terrain, car un bloc erratique de bonne taille se trouve sur le parcours du sentier didactique. Il s'agit d'un bloc de conglomérat qui a été exhumé à quelques mètres de là, lors du creusement des fondations du « Donjon ». Ce conglomérat semble pouvoir être d'origine du Mont-Pèlerin. Dans le panneau sur les blocs erratiques, je décide effectivement de le considérer comme tel, car cela rentre dans une certaine logique tout à fait compréhensible pour le lecteur : le glacier sort de la Vallée du Rhône au niveau de Vevey et croise le Mont-Pèlerin sur son chemin en direction de Thierrens. Il arrache un morceau de conglomérat qu'il déposera plus tard sur la colline de la Commounaille.

Le panneau qui suit traite de la suite et fin de l'histoire géologique du Bois des Brigands, à savoir la formation du sol. Il y a à peu près 15'000 ans, lorsque le glacier se retire, il laisse la roche, moraine et molasse, nue. Au contact de l'atmosphère, la roche s'altère et se transforme lentement en sol. Avec l'amélioration du climat la forêt se densifie. Ce panneau donne donc une bonne base à l'histoire de la forêt et fait le lien entre géologie et biologie. Il suggère que c'est la roche, matériel minéral inorganique, qui finalement permet à la vie de se développer. La roche est donc la base indispensable à la vie. Ce panneau propose au lecteur d'observer le sol et de reconnaître les caractéristiques minérales, héritées de la roche, et les caractéristiques organiques, héritées de la végétation.

Le panneau suivant invite le lecteur à s'intéresser de plus près aux roches, à leur aspect et à leur histoire. Il joue sur la fascination des hommes pour la pierre. Il rappelle que c'est en cassant la roche que l'on découvre son trésor et lui propose d'essayer de différencier la molasse des roches appartenant à la moraine.

Finalement, le dernier panneau résume l'histoire qui a été racontée jusque-là, à l'aide d'une coupe stratigraphique schématique. Il indique que, dans la région, les roches se superposent en suivant une règle simple : plus c'est profond, plus c'est vieux. De plus il rappelle que chaque roche raconte une histoire, un paysage, un climat. En fait il restitue la véritable démarche du géologue qui est d'observer les roches et leur succession et d'ensuite en faire une histoire.

Ces panneaux, qui racontent l'histoire géologique du Bois des Brigands, sont précédés, sur le sentier didactique, par quatre panneaux d'introduction théorique. Ils ont en fait pour rôle de préparer le lecteur à la suite du parcours. Comme il en a été fait mention plus haut, réfléchir en millions d'années, ou imaginer un paysage totalement différent du paysage d'aujourd'hui demande une certaine expérience que le lecteur n'a vraisemblablement pas. Ces quatre panneaux, en plus de donner quelques bases théoriques, préviennent le lecteur qu'il devra essayer de réfléchir différemment et qu'il

devra faire un certain travail d'imagination. Le premier rappelle que la géologie est une science qui traite de l'histoire de la Terre et prépare le lecteur à remonter le temps et à ce plonger dans le passé. Le deuxième panneau est dédié à l'échelle du temps. Il rappelle que la Terre est âgé de 4,5 milliards d'années et qu'en géologie, on compte en millions d'années. Le lecteur est donc prévenu qu'il devra abandonner son échelle temporelle habituelle. À l'échelle humaine, les changements géologiques qui affectent la Terre sont si lents que l'on a l'impression, peut-être, que rien ne se passe. Ce panneau met également en garde contre cette idée fausse et rappelle que sur Terre, à l'échelle des temps géologique, il se passe énormément de choses et que des variations climatiques et des changements de paysage se produisent constamment. Dans une forêt comme celle du Bois des Brigands, la présence de la roche est très discrète. Le troisième panneau d'introduction a pour but de rappeler le lecteur que la Terre est constitué en grande partie de roche et que si elle n'est pas toujours visible, elle est toujours sous-jacente à toute forme du paysage. Le quatrième panneau d'introduction donne les bases de la tectonique des plaques. Cette introduction est nécessaire pour comprendre la formation des Alpes. De plus, il montre à nouveau que certaines choses qui nous paraissent immuables, comme la position des continents ou la forme des océans, sont en fait très mobiles à l'échelle des temps géologique. Pour faire un lien avec un phénomène très concret et que tout le monde connaît, ce panneau rappelle que les tremblements de Terre sont dus aux mouvements des plaques tectoniques.

7.2.4 *Structure des panneaux*

La structure des panneaux que Nikola ZARIC avait précédemment réalisés pour le Bois de Brigands a été conservée. Premièrement les panneaux se composent d'un titre accrocheur. L'information principale qui sera traitée dans le texte doit être contenue dans le titre. Le texte principal, composé d'une centaine de mots, est volontairement court. Il traite de l'information donnée dans le titre. Autant que possible, il a été essayé de ne traiter, dans cette partie, qu'une information à la fois. Par exemple, s'il s'agit d'évoquer de la formation des Alpes, de ne parler que des Alpes, et de ne pas déjà faire intervenir l'érosion et la molasse. Une deuxième partie texte, plus courte, a été utilisée pour aider à la compréhension du texte principal. Cette partie comporte soit des exemples concrets, soit elle invite le lecteur à faire appel à ses connaissances préalables. Parfois, elle sert simplement à donné un complément d'information au texte principal. Dans les toutes premières versions des textes, cette partie invitait parfois le lecteur à se fondre dans le paysage d'antan et à s'imaginer être dans le Bois des Brigands tel qu'il était plusieurs millions d'années en arrière. Cependant, cette partie est devenue inutile avec l'arrivée des dessins, puisqu'ils décrivent le paysage de façon beaucoup plus explicite qu'un texte.

Chaque panneau comporte des illustrations. Elles ont été réalisées par Nikola ZARIC à partir des textes et de mes propositions. Nous avons ensuite modifié et corrigé ensemble les dessins qui le nécessitaient. Par la suite, j'ai modifié les textes pour les

adapter aux illustrations. Il a par exemple parfois été possible de raccourcir les textes, car beaucoup d'information était contenu dans le dessin seul. La nature des illustrations est très diverse. Elles mettent souvent en scènes des enfants et invitent les jeunes lecteurs à s'y identifier. Chaque panneau qui raconte un morceau de l'histoire géologique de la région comporte un dessin schématique de l'échelle géologique avec la date à laquelle on se trouve (c.f. figure 7.1)

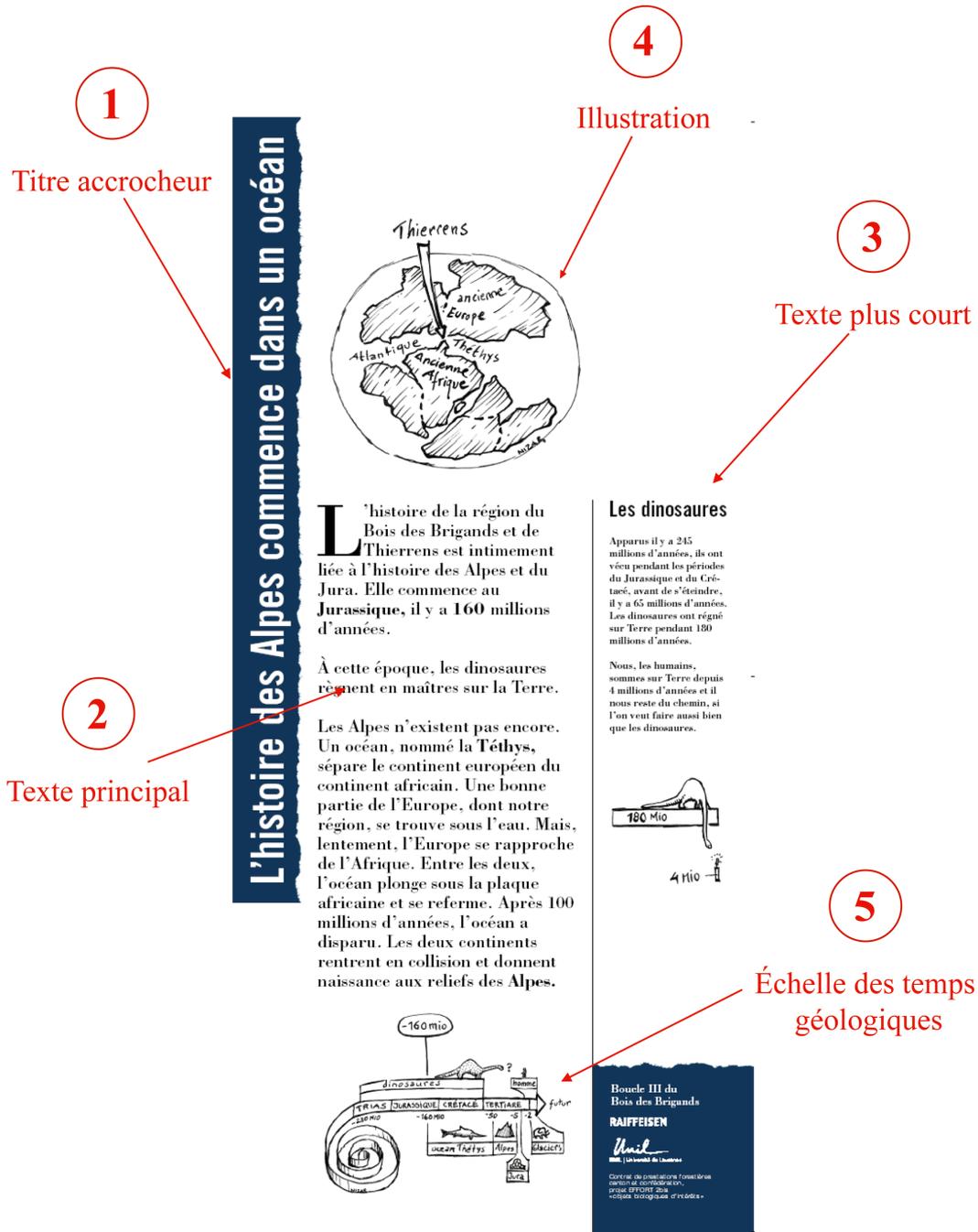


Figure 7.1 : Structure d'un panneau.

Bibliographie

- AUBERT, D. (1975): *L'évolution du relief jurassien*. Eclogae geol. Helv. 68/1, 1-64.
- AUBERT, D. (1981): *Géomorphologie du Gros-de-Vaud*. Mémoire Soc. vaud. Sci. nat. 17/2 (100), 57-116.
- AUBERT, D. (1989): *La protection des blocs erratiques dans le canton de Vaud*. Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 79/3: 185-207.
- BADOUX, H., ONDE, H. et al. (1971): *Encyclopédie illustrée du pays de Vaud, tome 2 : Une Terre, ses origines, ses régions*. Feuille d'avis de Lausanne.
- BADOUX, H. (1995): *Le glacier du Rhône au Pléistocène*. Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 83/4: 245-292.
- BAIZE, D. (2000): *Guide des analyses en pédologie*. Institut national de la recherche agronomique Paris, 257 p.
- BAIZE, D. et GIRARD, M.-C. (1995): *Référentiel Pédologique*. Association française pour l'étude du sol Paris, 332 p.
- BAIZE, D. et JABIOL, B. (1995): *Guide pour la description des sols*. Institut national de la Recherche agronomique Paris, 375 p.
- BEHMER, C. A. K. (1912): *Die erratischen Blöcke in der Freiburger Ebene*. Diss. Univ. Freiburg.
- BERGER, J.-P. (1985): *La transgression de la molasse marine supérieure (OMM) en Suisse occidentale*. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen. (A) 5, 1-208.
- BERSIER, A. (1942): L'origine structurale des collines et alignements morphologiques orientés du Plateau vaudois. Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 62 (N°258). 135-158.
- BRÄNDLEIN, P., NOLLAU, G., SHARP, Z. and VON RAUMER, J. (1994): *Petrography and geochemistry of the Vallorcine-Granite (Aiguilles Rouges Massiv, Estern Alps)*. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 74: 227-243.
- DALLA PIAZZA, R. (1996): *Géochimie des altérations dans trois écosystèmes sol tempérés. Applications à l'acquisition des caractéristiques chimiques des solutés*. Thèse N° 1483, EPFL.
- DUCHAUFOR, P. (1965): *Précis de pédologie*. (Masson & Cie), Paris.
- DUCHAUFOR, P. (1983): *Pédologie, tome 1: Pédogenèse et classification*. (Masson), Paris.
- DUCHAUFOR, P. (1997): *Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement*. (Masson), Paris.
- GOBAT, J.-M., ARAGNO, M. et MATTHEY, W. (2003): *Le sol vivant*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 568p.
- GRATIER, M. et BARDET, L. (1980): *Les sols du plateau vaudois*. Mém. Soc. vaud. Sci. nat. 6/3 (99), 89-188.
- HAEBERLI, R. (1971): *Carte écologique-physiographique des sols du canton de Vaud au 1:100000*. Cahier de l'Aménagement régional, n°12, 119 p.

- HESSKE, S. (1995): *Typologie des eaux souterraines de la Molasse entre Chambéry et Linz (France, Suisse, Allemagne, Autriche)*. Thèse No 1417. École Poly technique Fédérale de Lausanne.
- PARRIAUX, A. (1978): *Quelques aspects de l'érosion et des dépôts quaternaires du bassin de la Broye*. Eclogae geol. Helv. 71/1, 207-217.
- PUPIN, J.P. (1976): *Signification des caractères morphologiques du zircon commun des roches en pétrologie. Base de la méthode typologique. Applications*. Thèse Doct. Univ. Nice (France), 394 p.
- PUPIN, J.P. (1980): *Zircon and granite petrology*. Contrib. Mineral. Petrol. 73, 207-220.
- RUELLAN, A. et DOSSO, M. (1993): *Regards sur le sol*. Foucher AUPELF. 192 p.
- TRÜMPY, R. et BERSIER, A. (1954): *Les éléments des conglomérats oligocènes du Mont-Pèlerin. Pétrographie, statistique, origine*. Eclogae geol. Helv. 47/1, 119-166.
- VON RAUMER, J. and BUSSY, F. (2004): *Mont Blanc and Aiguilles Rouges. Geology of their polymetamorphic basement (External Massifs, Western Alps, France-Switzerland)*. Mémoires de Géologie, Lausanne, 42: 1-204.
- BRÄNDLEIN, P. (1991): *Petrographische und geochemische Charakteristika des Vallorcine-Granits, Aiguilles-Rouges-Massiv (Westalpen, Schweiz)*. PHD Thesis, Erlangen, 146 p.
- BUSSY, F. (1990): *Pétrogenèse des enclaves microgrenues associées aux granitoïdes calco-alcalins: exemple des massifs varisque du Mont-Blanc (Alpes occidentales) et miocène du Monte Capanne (Ile d'Elbe, Italie)*. Mémoires de Géologie, Lausanne, 7: 1-309.
- CHOFFAT, P. et AUBERT, D. (1983): *Erosion et morphologie glaciaires de la molasse*. Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 76, 321-340.
- INGLIN, H. (1960): *Molasse et quaternaire de la région de Romont*. Bull. Soc. fribourg. Sci. nat. 49, 1-94.
- LEGROS, J.-P. (2007): *Les grands sols du monde*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.
- LOZET, J. et MATHIEU, C. (1990): *Dictionnaire de Science du Sol*. Tec&Doc, 384 p.
- MARTHALER, M. (2005): *Le Cervin est-il africain ? Une histoire géologique entre les Alpes et notre planète*. Éditions LEP.
- PARRIAUX, A. (1970): *Etude géologique et géophysique des régions de Bercher et Thierrens*. Dipl. Univ. Lausanne. (Inéd.).
- SPALTENSTEIN, H. (1980): *Les principaux types de sols du Bois de Chênes (VD), et modèle de répartition spatiale*. Bull. Soc. vaud. Sc. Nat. N°357, vol. 75.
- WEIDMANN, M. (1987): *Les dessous d'une ville: Petite géologie lausannoise*. Les cahiers de la forêt lausannoise, n° 2.
- ZRYD, A. (2001): *La nature dans les Alpes, tome 4 : Les Glaciers*. Éditions Pillet (Saint-Maurice).

Annexe A : Carte géologique

Extrait de la feuille d'Yverdon-les-Bains (JORDI 1994)

(Atlas géologique de la Suisse 1:25'000 ; © OFEG-Berne/Swisstopo-Wabern GA-
PK2511).

Annexe B : Profil S17

Profil S17		cm	horizons	pH	
Profondeur (cm)	0	2	OL		litière peu épaisse composée de principalement de feuilles.
	7	7	A ₁	4.5	horizon organo-minéral, texture limoneuse, nombreuses racines, couleur brun foncé. Transition graduelle.
	12	12	A ₂	5	très semblable à l'horizon supérieur, mais mieux structuré. Transition avec l'horizon inférieur diffuse.
	47	47	B	5	Couleur plus beige, texture finement sableuse, racines encore dans les premiers 10 cm. Structure polyédrique sub anguleuse. Transition nette avec l'horizon inférieur.
	80	80	C	5	couleur gris-verdâtre, sable fin. Horizon de molasse altérée et décarbonatée.

Annexe C : Profil S12

Profil S12		cm	horizons	pH	
Profondeur (cm) 	0	1	OL		litière peu épaisse composée de principalement de feuilles.
	5	A ₁	5		horizon organo-minéral, texture limo-sableuse, nombreuses racines. Couleur brun très foncé.
	8	A ₂	5		texture limoneuse, légèrement argileuse. Couleur brun foncé. Contient moins de racine. Transition graduelle avec l'horion supérieur et inférieur.
	80	B	5		Horizon plus structuré. Couleur brune, avec gradation de l'intensité de la couleur vers le bas (brun plus coloré vers le bas). Texture légèrement plus argileuse.

Annexe D : XRF

Eléments totaux mesuré par XRF. Les éléments majeurs sont exprimés en % poids d'oxydes, les traces en ppm.

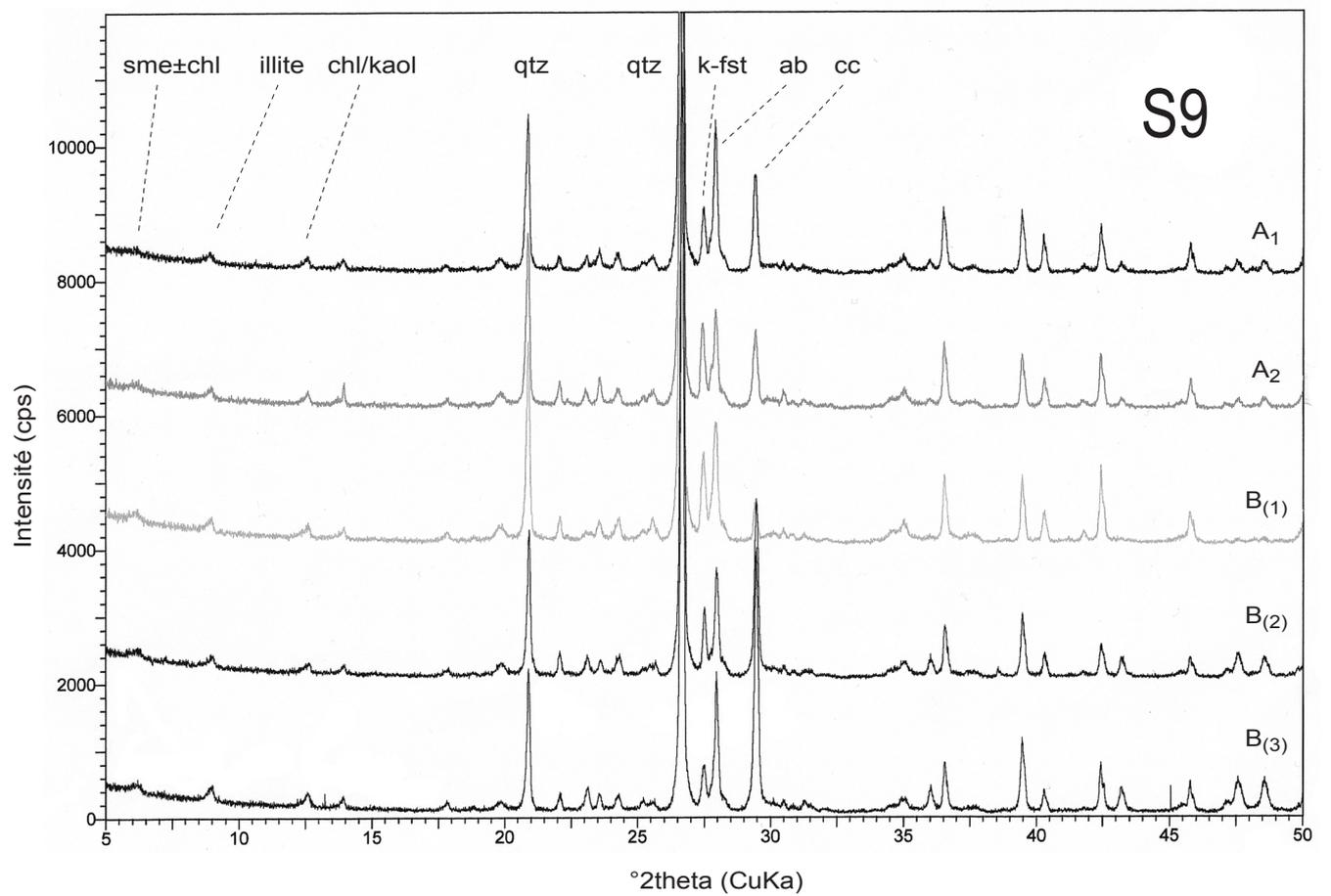
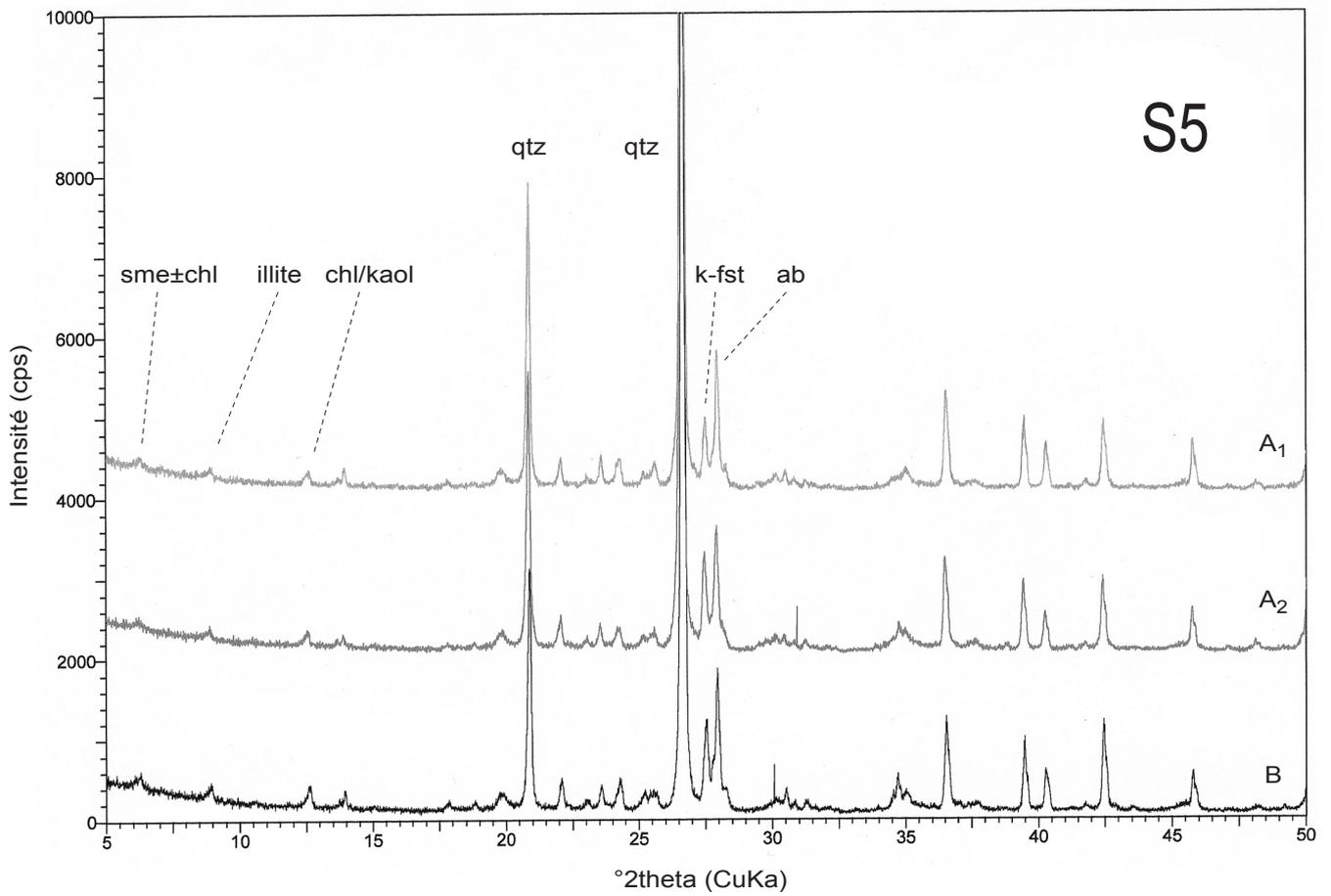
Profils	horizons	prof.(cm)	(% poids)														(ppm)												
			LOI	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	MnO	Fe2O3	K2O	CaO	TiO2	Zr	Y	Sr	Rb	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Cr	V	Ce	Nd	Ba	La	S
S5	A1	0-7	9.56	1.38	1.63	10.40	70.38	0.21	0.07	3.27	2.01	0.41	0.44	164	17	69	82	26	51	0	20	44	101	63	37	13	344	20	227
	A2	7-30	6.10	1.42	1.91	11.65	72.02	0.19	0.12	3.32	2.16	0.42	0.45	172	21	71	90	21	52	11	22	57	92	66	41	16	366	21	59
	B	30-70	4.52	1.33	2.23	13.12	71.33	0.15	0.11	3.77	2.30	0.41	0.52	183	21	73	98	20	57	10	30	32	100	73	55	21	384	19	69
S8	A1	0-2	27.58	1.07	1.02	7.68	57.00	0.40	0.05	2.37	1.50	0.59	0.36	142	9	56	56	59	51	8	14	39	129	73	50	14	361	32	3239
	A2	2-10	7.71	1.42	1.59	10.59	72.39	0.20	0.10	2.95	1.96	0.44	0.42	161	16	70	87	27	46	8	18	44	97	57	36	11	352	18	106
	B	10-60	4.16	1.56	1.81	11.85	73.95	0.13	0.13	3.18	2.11	0.47	0.44	172	20	73	86	19	49	10	22	36	93	56	40	14	362	19	60
S9	A1	0-5	16.38	1.08	2.20	10.05	55.86	0.25	0.13	3.48	2.05	7.85	0.37	173	22	144	74	22	64	16	29	37	123	68	38	25	384	24	753
	A2	5-30	12.11	1.16	2.34	10.74	60.48	0.23	0.15	3.75	2.09	6.27	0.40	174	23	129	80	22	62	18	30	36	131	72	33	21	397	26	394
	B(1)	30-45	5.81	1.22	2.73	12.68	66.68	0.22	0.13	4.46	2.41	2.93	0.45	170	28	108	94	19	55	21	37	34	152	82	36	20	406	24	126
	B(2)	45-60	10.07	1.16	2.46	10.36	56.79	0.17	0.12	3.71	2.17	12.34	0.39	178	27	196	74	8	47	18	31	37	108	59	27	25	361	27	100
B(3)	60-84	12.12	1.12	2.31	8.94	52.04	0.15	0.10	3.47	1.93	17.21	0.35	190	24	254	63	3	41	21	26	32	156	55	16	18	345	24	72	
S10	A1	0-10	9.16	1.39	1.83	11.33	69.29	0.22	0.09	3.29	2.05	0.63	0.45	184	19	75	83	28	60	13	21	39	104	66	49	19	357	22	183
	A2	10-40	5.53	1.49	2.03	12.21	71.39	0.19	0.12	3.61	2.20	0.52	0.48	183	21	77	89	22	56	11	24	36	100	68	46	18	375	23	132
	B(1)	40-70	3.92	1.50	2.22	12.82	71.72	0.19	0.16	3.84	2.31	0.61	0.50	190	24	80	95	20	61	11	28	31	99	70	50	18	419	23	86
	B(2)	70-100	4.09	1.40	2.40	12.91	70.95	0.21	0.16	4.04	2.34	0.76	0.50	196	27	85	99	21	67	11	33	33	120	74	51	20	445	22	60

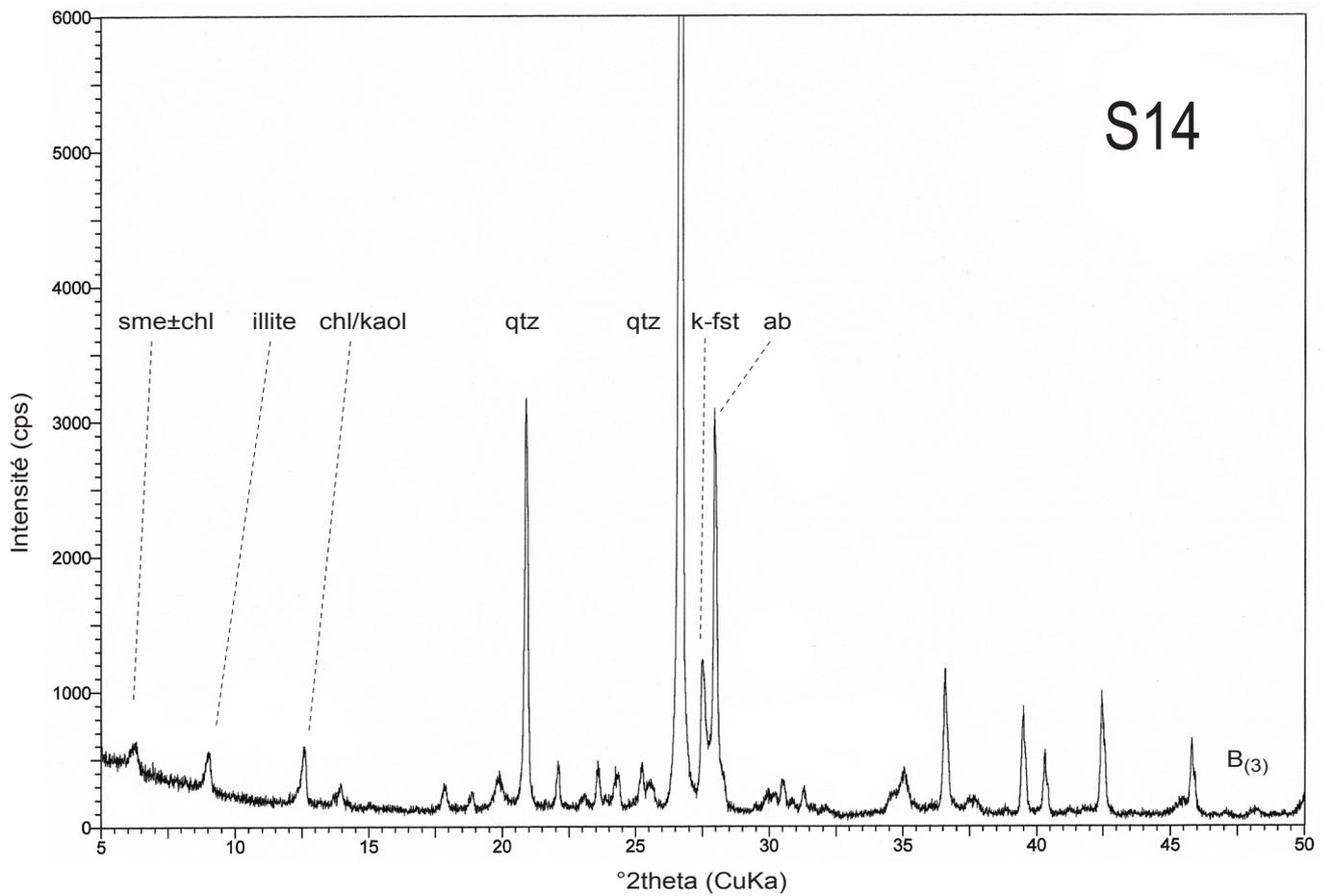
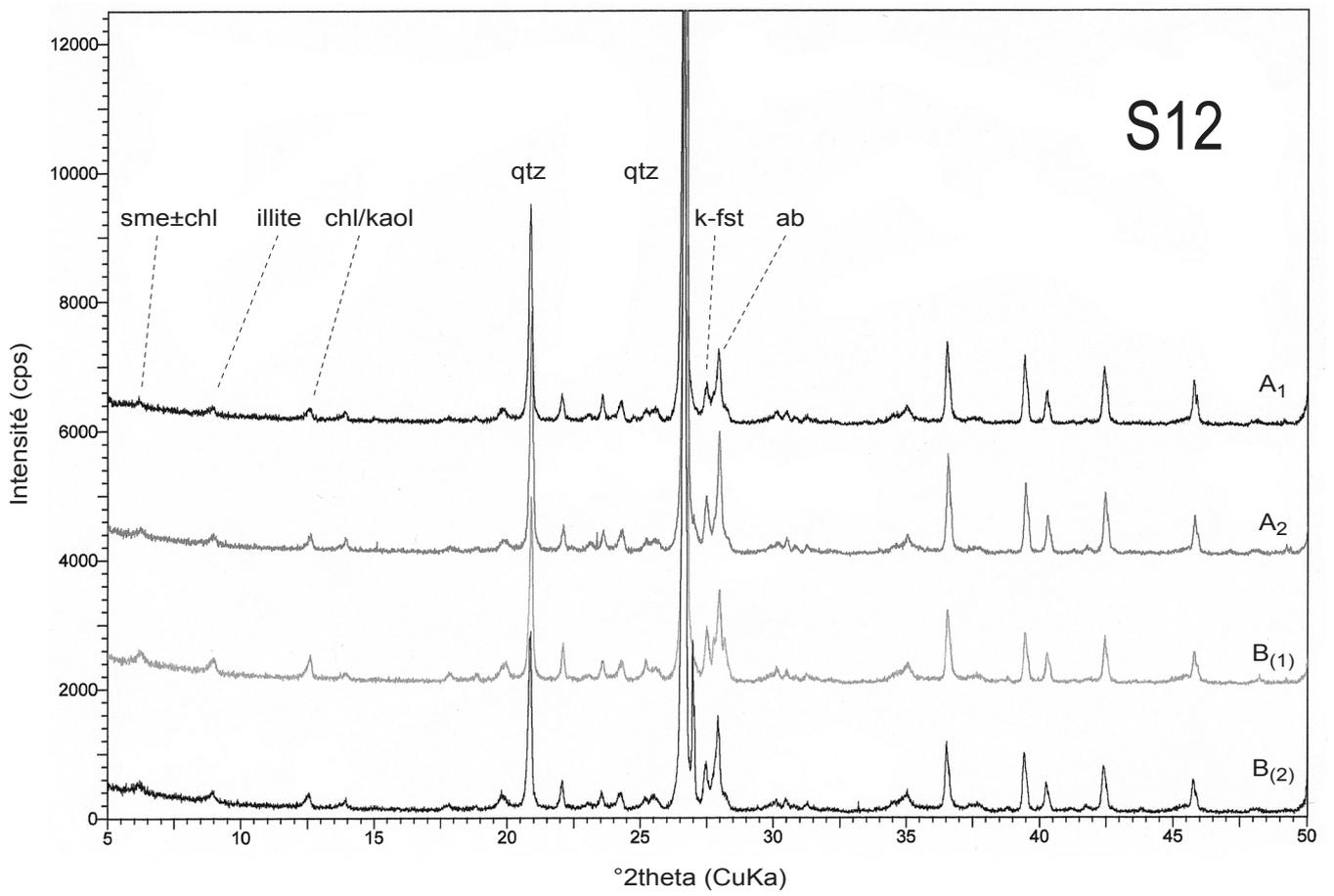
Profiles	horizons	prof.(cm)	LOI	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	MnO	Fe2O3	K2O	CaO	TiO2	Zr	Y	Sr	Rb	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Cr	V	Ce	Nd	Ba	La	S
S11	A1	0-5	14.22	1.33	1.87	10.44	64.49	0.29	0.09	3.16	1.93	1.45	0.41	185	20	84	74	25	63	10	23	54	113	68	46	16	373	25	584
	A2	5-20	10.93	1.29	1.99	11.39	66.56	0.29	0.08	3.35	1.97	1.40	0.45	187	21	87	77	27	59	12	24	31	114	68	42	14	388	22	462
	B(1)	20-40	4.67	1.46	1.91	11.78	72.82	0.18	0.10	3.42	2.14	0.83	0.46	183	23	79	83	22	50	10	21	35	101	63	45	16	354	26	117
	B(2)	40-60	4.48	1.47	2.11	12.25	72.24	0.18	0.10	3.64	2.15	0.67	0.47	196	24	80	87	21	52	12	25	37	118	70	51	19	365	21	74
	B(3)	60-80	4.48	1.35	2.68	13.60	69.37	0.15	0.11	4.52	2.32	0.68	0.49	176	23	81	94	21	61	17	34	39	117	87	50	21	396	26	120
S12	A1	0-5	10.97	1.48	1.72	10.42	68.67	0.18	0.09	3.17	2.05	0.56	0.41	183	17	74	81	28	55	12	19	67	91	64	36	10	353	18	151
	A2	5-13	7.19	1.56	1.73	10.95	71.80	0.15	0.05	3.28	2.16	0.46	0.42	189	19	75	83	27	52	12	21	67	92	60	37	13	349	15	77
	B(1)	13-60	4.75	1.40	2.45	13.84	70.05	0.13	0.10	4.55	2.54	0.36	0.51	189	24	79	102	24	61	18	33	43	99	90	50	19	402	25	89
	B(2)	60-90	3.83	1.39	2.35	13.16	71.02	0.13	0.10	4.40	2.44	0.46	0.45	173	26	84	99	23	56	19	32	56	135	82	49	23	395	22	44
S14	B(3)	60-105	4.28	1.35	3.10	14.73	67.65	0.19	0.03	4.36	2.64	0.91	0.50	189	25	86	102	23	56	17	35	37	127	96	50	25	441	30	58
S15	A1	0-8	22.23	1.26	1.26	9.99	59.27	0.27		2.94	1.59	0.46	0.40	169	12	61	52	52	44	8	14	36	112	78	59	17	303	25	1874
	A2	8-20	8.30	1.48	1.69	12.49	69.36	0.14	0.05	3.45	1.91	0.44	0.47	181	18	73	74	22	44	8	19	48	86	67	43	17	336	22	177
	B(1)	20-60	5.53	1.64	1.90	13.41	70.58	0.12	0.05	3.51	2.08	0.46	0.49	195	20	74	82	20	48	6	19	30	89	69	48	18	350	23	131
	B(2)	60-104	3.78	1.76	1.86	12.73	72.79	0.10	0.08	3.47	2.23	0.49	0.49	192	19	78	92	20	44	6	22	41	87	62	49	17	377	18	92
S17	A1	0-7	12.44	1.56	2.46	11.97	63.00	0.31	0.11	4.15	2.49	0.87	0.36	131	18	66	93	22	56	4	31	39	154	71	51	21	366	34	925
	A2	7-19	8.83	1.58	2.48	12.43	66.17	0.24	0.10	4.12	2.67	0.79	0.37	116	20	67	97	22	51	7	30	32	122	69	52	21	369	31	658
	B	19-66	4.73	1.79	2.72	13.00	68.93	0.16	0.10	4.46	2.86	0.68	0.35	120	26	71	102	17	51	8	33	41	124	67	45	23	386	31	168
	C	66-87	3.32	1.87	3.42	12.78	68.86	0.18	0.11	4.91	3.07	0.96	0.31	95	29	83	105	15	53	6	37	50	168	73	52	32	386	34	119
	BDB-25	-	11.00	1.58	2.82	8.92	50.77	0.23	0.09	4.03	2.44	17.66	0.25	90	22	185	72	2	42	8	27	33	103	47	22	25	350	21	147

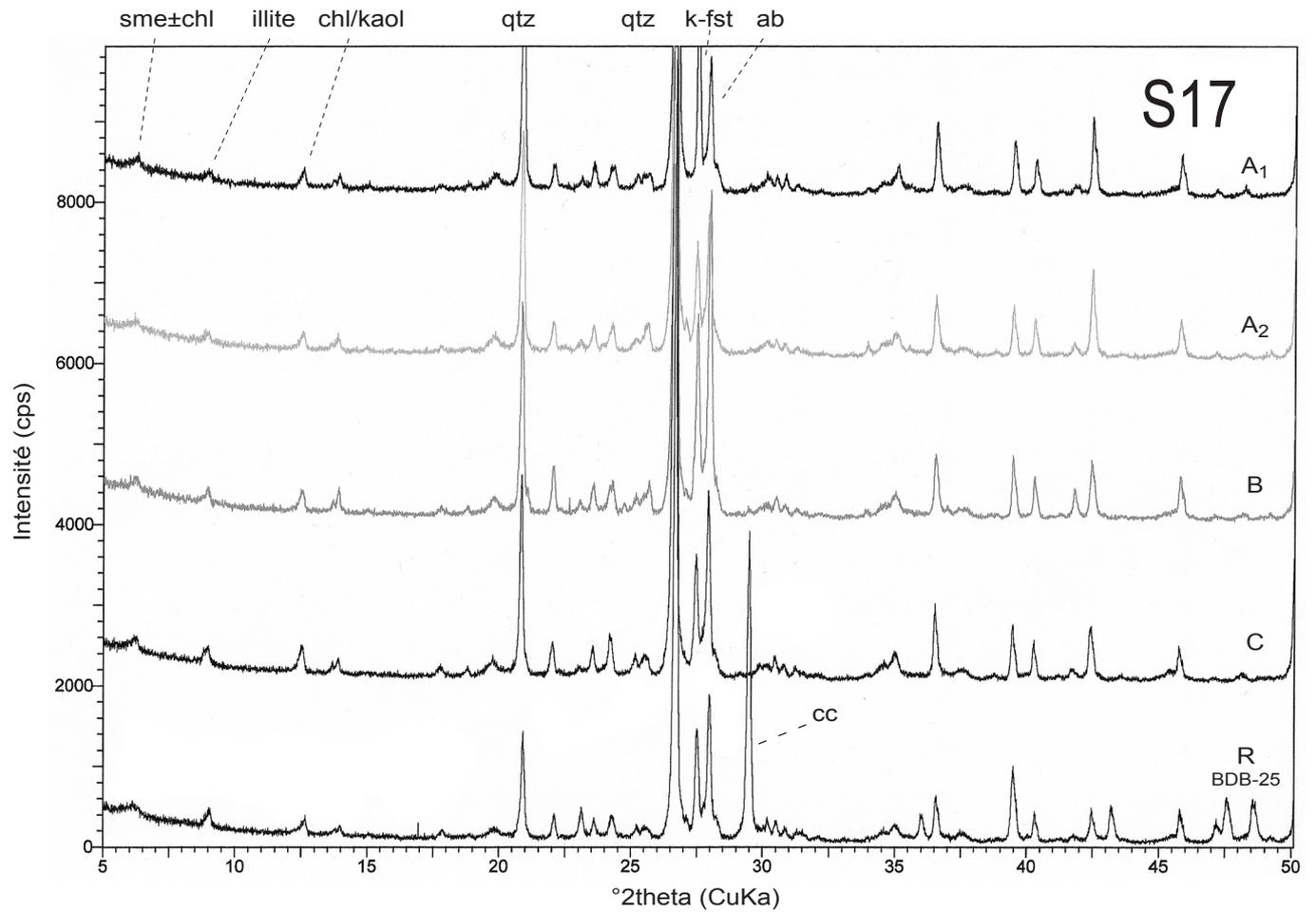
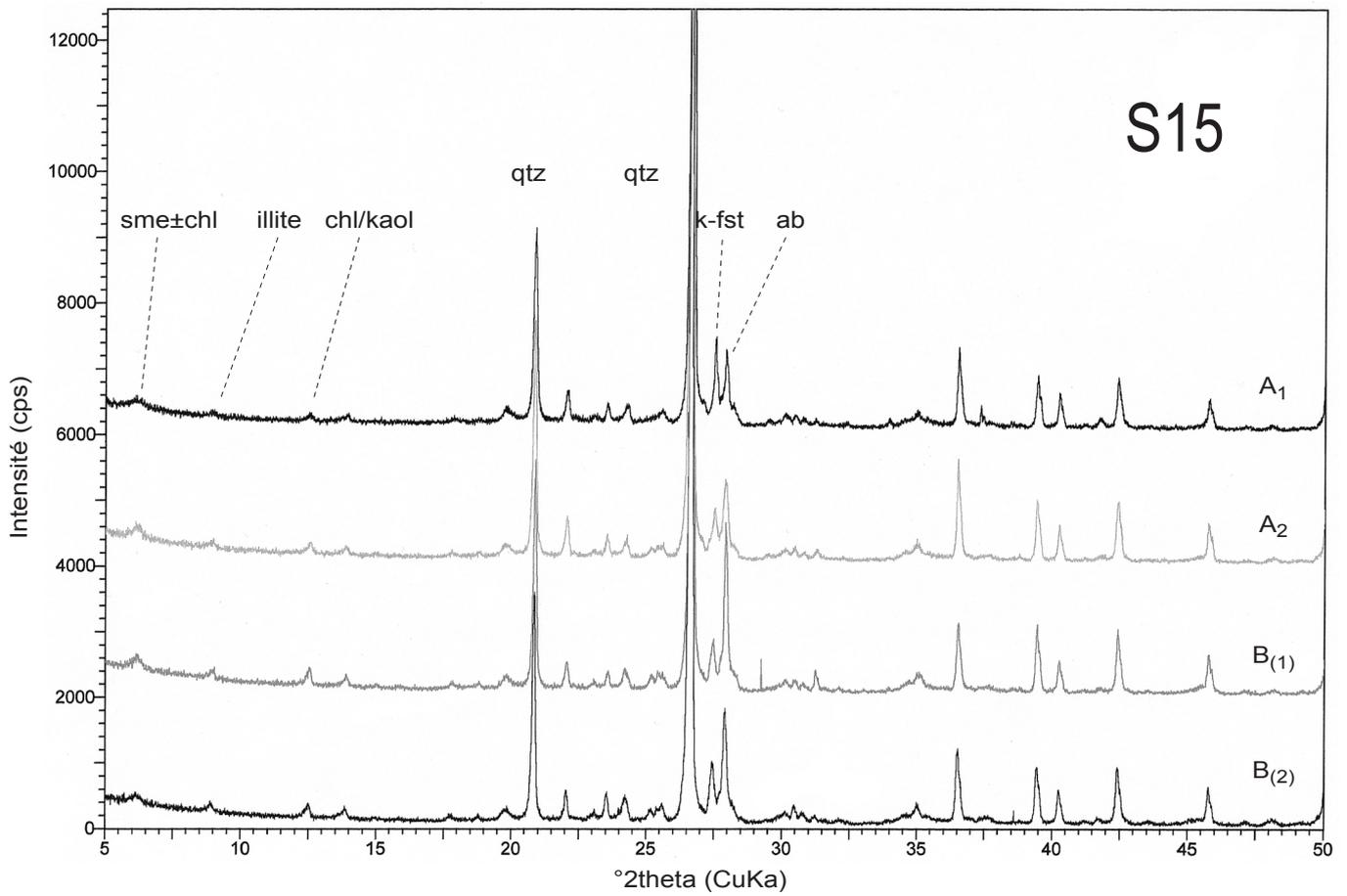
Annexe E : XRD

Diffractogrammes

(Pour chaque profil, les spectres de chaque horizon se superposent au sein d'un même diffractogramme. Sur le graphique, les spectres ont été séparés de 2000 cps).







Annexe F : XRD

Estimation des teneurs en minéraux majeurs à partir des analyses XRD.
L'erreur sur chaque mesure est de $\pm 4\%$.

Profils	horizons	prof. (cm)	qtz	k-fst	ab	cc	phyllosilicates	
							total	% illite
S5	A1	0-7	62	9	19	-	10	5
	A2	7-30	59	12	16	-	13	6
	B	30-70	53	15	17	-	15	8
S9	A1	0-5	57	8	10	15	10	5
	A2	5-30	65	8	9	12	6	4
	B(1)	30-45	56	7	19	7	11	6
	B(2)	45-60	60	5	8	15	12	6
	B(3)	60-84	55	6	8	20	11	7
S12	A1	0-5	65	9	17	-	9	5
	A2	5-13	65	8	18	-	9	5
	B(1)	13-60	58	10	16	-	16	9
	B(2)	60-90	58	8	15	-	19	8
S14	B(3)	60-105	54	1	23	-	22	9
S15	A1	0-8	60	12	19	-	9	4
	A2	8-20	63	5	20	-	12	7
	B(1)	20-60	61	5	21	-	13	8
	B(2)	60-104	58	7	19	-	16	9
S17	A1	0-7	62	16	12	-	10	6
	A2	7-19	57	12	20	-	11	5
	B	19-66	51	15	21	-	13	5
	C	66-87	49	13	21	-	17	9
	BDB-25	-	30	8	12	40	10	8

Annexe G

Localisation des échantillons analysés et décrits dans cette étude.

échantillons de roche

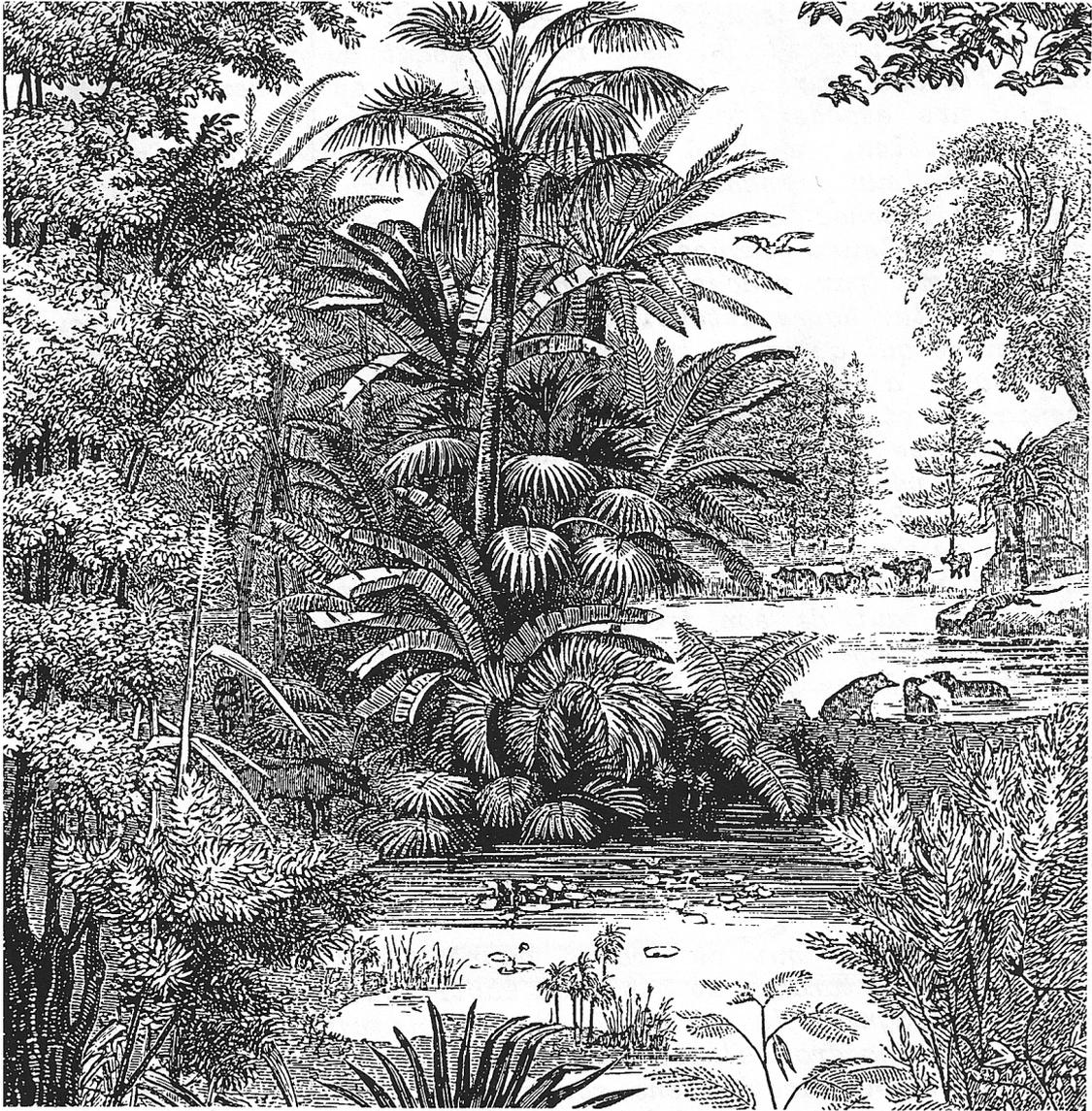
Nom	Y	X
BDB2	171165	547228
BDB3	171197	547877
BDB5	172575	548300
BDB6	174225	547475
BDB8	171736	547972
BDB12	171528	547694
BDB13	171446	547643
BDB14	171032	547447
BDB15	171032	547447
BDB16	171116	547476
BDB18	171005	547547
BDB20	171006	547569
BDB21	171006	547569
BDB22	171006	547569
BDB24	171006	547569
BDB25	170833	546881
BDB27	171185	546979
BDB28	171059	547176
BDB30	171320	547722

échantillons de sol

Nom	Y	X
S5	171478	547871
S8	171552	548011
S9	171775	548128
S10	171329	547870
S11	171272	547629
S12	171747	548051
S14	171050	547004
S15	171047	547028
S17	170817	546877

Annexe H

Paysage du Plateau vaudois au temps de la molasse d'eau douce inférieure.
Reconstitution due à Oswald Heer, 1864.



Annexe J : Panneaux didactiques

À la découverte de l'histoire de la Terre