

Caractérisation biogéologique d'une zone du Jura suisse selon trois échelles spatio-temporelles

Arnet Aurélie, Martignier Loraine & Scherrer Luc

Travaux de master

Volume 1 : Texte

Université de Neuchâtel
Laboratoire Sol & Végétation (LSV)
Laboratoire de Géodynamique de la Biosphère (LGB)

janvier 2008

Résumé

Dans une combe derrière la crête de Chasseral (BE) se situe une forêt atypique liée à la présence de silex. Le contexte alentour de pâturages boisés et de Hêtraie à érable, caractéristique de cet étage du Jura suisse, est utilisé comme référence. Afin d'étudier globalement le fonctionnement de la zone, une approche biogéoscientifique multiscalaire est décidée. Trois étudiants travaillent à des échelles spatiales différentes, révélatrices de processus distincts.

D'une part, le paysage et les formations superficielles sont étudiés par des analyses granulométriques, des analyses minéralogiques et la réalisation de cartes de la zone.

D'autre part, les sols font l'objet d'analyses pédologiques classiques et leur fonctionnement est révélé au travers de composés comme le fer, la silice et les carbonates.

Finalement, les formes d'humus sont abordées selon deux échelles de temps. Une typologie est réalisée, allant du milieu calcaire au milieu siliceux.

Ces trois aspects démontrent la forte influence des silex sur le lieu. Une chronologie des dynamiques de mise en place est finalement réalisée de la sortie du Würm à nos jours. L'activité humaine intervient également dans la compréhension générale de l'endroit.

Table des matières

Résumé	i
1 Introduction	5
1.1 Situation générale	5
1.2 Situation de la zone d'étude	10
1.3 Historique	11
2 Objectifs	15
3 Méthodologie	17
4 Etude du paysage	19
4.1 Introduction	19
4.1.1 Les formations superficielles	20
4.2 Objectifs	21
4.3 Méthodologie	21
4.4 Matériel & Méthodes	22
4.4.1 Prise de contact avec le lieu d'étude	22
4.4.2 Sur le terrain : prise de données et échantillonnage	22
4.4.3 Réalisation des cartes	22
4.4.4 Analyses granulométriques	23
4.4.5 Analyses minéralogiques des argiles	24
4.4.6 Traitement statistique des observations de terrain	24
4.4.7 Etude d'une zone choisie	25
4.5 Résultats	25
4.5.1 Les cartes	25
4.5.2 Les analyses granulométriques	28
4.5.3 Les analyses minéralogiques	30
4.5.4 Les analyses statistiques des observations de terrain	35
4.5.5 L'étude d'une zone choisie	36
4.6 Discussion & Interprétation	39

4.6.1	Les cartes	39
4.6.2	Les analyses granulométriques	41
4.6.3	Les analyses minéralogiques	48
4.6.4	Les analyses statistiques des observations de terrain . .	51
4.6.5	L'étude d'une zone choisie	52
4.6.6	Discussion générale	55
4.7	Conclusion	57
5	Pédologie	59
5.1	Introduction	59
5.1.1	Définitions	59
5.1.2	Intérêts de la zone	60
5.2	Etat de la recherche	60
5.3	Objectifs	60
5.4	Méthodologie	61
5.4.1	Le terrain	61
5.4.2	Les analyses	61
5.5	Matériel & Méthodes	61
5.5.1	Le terrain	61
5.5.2	Les analyses	62
5.6	Résultats & Interprétations	65
5.6.1	Sol 1 (PODZOSOL OCRIQUE - RÉDOXISOL soliflué) : . .	66
5.6.2	Sol 13 (PODZOSOL OCRIQUE - RÉDOXISOL soliflué) : .	69
5.6.3	Sol 2 (RÉDOXISOL à substrat meuble) :	70
5.6.4	Sol 3 (RÉDUCTISOL TYPIQUE acide à anmoor) :	71
5.6.5	Sol 6 (PODZOSOL OCRIQUE sur BRUNISOL OLIGOSAT- URÉ) :	73
5.6.6	Sol 7 (PODZOSOL OCRIQUE) :	78
5.6.7	Sol 8 (PODZOSOL OCRIQUE) :	80
5.6.8	Sol 9 (BRUNISOL OLIGOSATURÉ) :	81
5.6.9	Sol 4 (BRUNISOL SATURÉ) :	82
5.6.10	Sol 11 (BRUNISOL SATURÉ) :	83
5.6.11	Sol 10 (CALCOSOL) :	84
5.6.12	Sol 12 (ORGANOSOL CALCAIRE ou LITHOSOL) :	85
5.6.13	Sol 16 (ORGANOSOL CALCIQUE) :	85
5.6.14	Sol 5 (ANTHROPOSOL ARTIFICIEL - LUVISOL - RÉDOX- ISOL) :	86
5.6.15	Sol 15 (BRUNISOL SATURÉ - RÉDOXISOL) :	87
5.6.16	Sol 14 (BRUNISOL SATURÉ) :	88
5.7	Discussion	89
5.8	Conclusion & Perspectives	97

6	Formes d'humus	99
6.1	Introduction	99
6.1.1	État de la recherche	100
6.2	Objectifs	100
6.3	Méthodologie	101
6.3.1	Choix du transect	101
6.3.2	Long terme	101
6.3.3	Court terme	102
6.4	Long terme	103
6.4.1	Matériel & Méthodes	103
6.4.2	Résultats & Interprétations	106
6.4.3	Discussion	117
6.5	Court terme	122
6.5.1	Matériel & Méthodes	122
6.5.2	Résultats	123
6.5.3	Discussion	126
6.6	Conclusion & Perspectives	130
7	Discussion commune	133
8	Conclusion générale	141
	Bibliographie et sources	143
	Remerciements	158

Chapitre 1

Introduction

1.1 Situation générale

Géographie

La zone étudiée se situe sur les crêtes de Chasseral (FIG. 1.1). Ce sommet du Jura suisse culmine à 1607m¹ et se situe dans le canton de Berne.

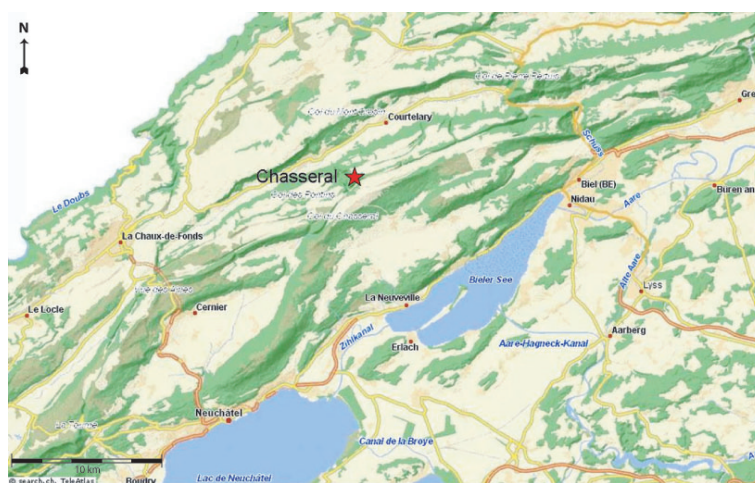


FIG. 1.1 – Carte de la situation du massif de Chasseral (source : www1).

Géologie et formation du Jura

Le Jura est constitué de roches sédimentaires du Secondaire, formant une alternance de calcaires et de marnes. La sédimentation à dominance carbon-

¹carte nationale swisstopo 1 : 25'000, n°1125

atée a lieu dans de vastes bassins peu profonds baignés dans une mer uniformément chaude (Guélat, 1992). Au début du Tertiaire commence l'orogénèse alpine. L'érosion forte alimente en sédiments le bassin molassique pendant l'Oligocène et le Miocène. A la fin du Miocène a lieu la dernière phase de l'édification des Alpes et les effets de la tectonique se font ressentir jusque dans la région jurassienne. D'après Aubert (1975), le plissement du Jura se produit plus particulièrement pendant le Messinien (7.1 Ma à 5.3 Ma) et entraîne la surrection de tout l'arc. Une série de plis parallèles s'érige sur le flanc est, provoquant une alternance d'anticlinaux et de synclinaux, alors que des plateaux tabulaires se forment vers l'ouest. Les grandes lignes de la topographie du Jura sont alors dessinées.

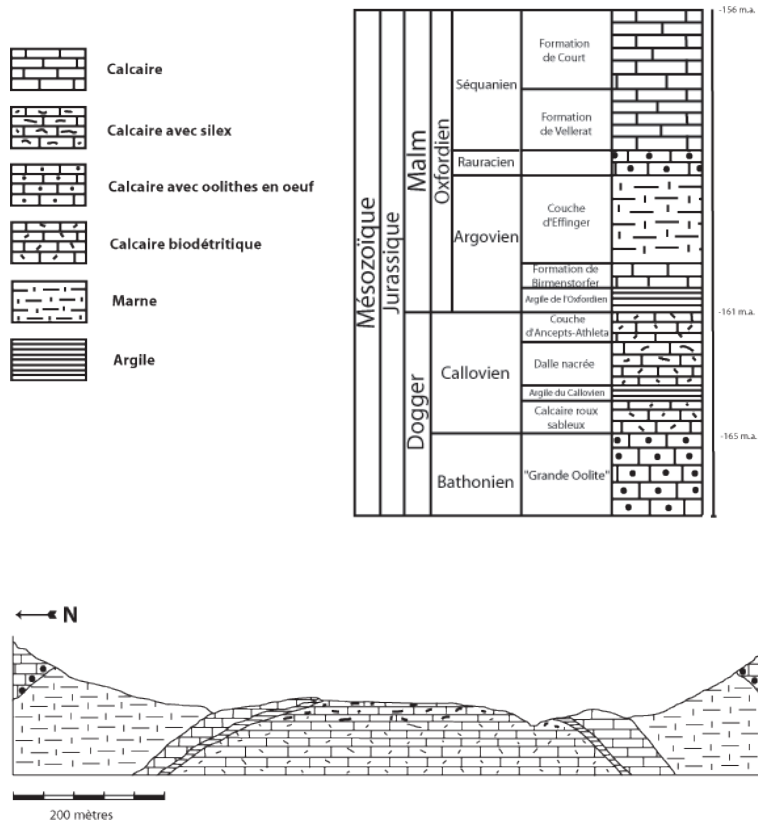


FIG. 1.2 – Coupe géologique de la combe étudiée et lithostratigraphie. (L'épaisseur des couches du tableau chronologique n'est pas à l'échelle.)

Les dépôts sédimentaires qui nous intéressent à Chasseral se sont déposés durant les époques du Dogger (-175 Ma à -154 Ma) et du Malm (-154 Ma à -135 Ma). Les différentes formations présentes sont la Dalle nacrée du

Callovien, les argiles de l'Oxfordien, la couche du Birmenstorfer, les marnes de l'Argovien, le Rauracien (qui correspond au niveau inférieur du Séquanien) et le Séquanien proprement dit (FIG. 1.2).

La Dalle nacrée est un calcaire brun roux se débitant en plaques et contenant de nombreux débris d'échinodermes. D'une épaisseur d'environ 25 m, cette formation comprend dans son niveau supérieur des nodules de silex (Kühni, n.d.). Au début du Malm se trouvent les argiles de l'Oxfordien. D'une épaisseur de 1,6 m, cette couche est constituée de marnes bleues et de calcaires ferrugineux. Par dessus se trouve la couche du Birmenstorfer, un calcaire blanc, dur et compact d'une vingtaine de mètres d'épaisseur. Puis viennent les marnes grises de l'Argovien dont l'épaisseur peut atteindre 130 m. Imperméables et facilement érodables, elles se retrouvent en général au fond des combes. Leurs limites avec les couches plus dures de calcaires sous- ou sus-jacent provoquent souvent la formation de séries de dolines. Le Rauracien, qui n'est pas toujours considéré comme une couche en soi, est un calcaire oolithique très coralligène (source : www2). Les calcaires fins du Séquanien ont des faciès variés, la plupart du temps oolithiques. Difficiles à éroder, ils forment fréquemment les crêtes aigües du Jura.

Morphologie et glaciations

Au Quaternaire ont lieu différents cycles de glaciation, connus sous le nom de Günz, Mindel, Riss et Würm. Le Jura est plusieurs fois recouvert de glaciers, mais leur origine alpine ou jurassienne n'est pas toujours définie. Aubert (1965) estime qu'il existe pendant le Würm une calotte locale basée dans la vallée de Joux, qui rencontre le glacier du Rhône au pied du Jura. Au nord-est de la chaîne se trouvent plutôt des glaciers locaux minces qui n'ont laissé que des moraines superficielles. La morphologie jurassienne en porte encore les traces. Les aires anciennement occupées par la calotte glaciaire présentent un relief accidenté ponctué de nombreux affleurements rocheux. Elles sont appelées "Jura rocheux". La région du Mont-Tendre en est un bon exemple. Par opposition, le "Jura-pelouse", qui n'a pas subi l'influence de la calotte glaciaire, possède une morphologie très adoucie et beaucoup plus uniforme, comme la montagne de Boudry.

A la fin du Pléistocène se terminent les glaciations (FIG. 1.3). L'Holocène apporte un climat plus doux et la végétation regagne du terrain. Au substrat glaciaire et périglaciaire laissé par les périodes froides s'ajoute des apports allochtones. Une partie de ces particules est issue de l'action de la déflation sur les Alpes. Quand les glaciers se retirent, la farine glaciaire des sandars est emportée par les torrents ou le vent et est redistribuée plus loin. Le Jura est recouvert d'environ 40 cm de loess, des limons éoliens d'origine alpine

(Pochon, 1973, 1978).

Géologie	Glaciation	Période	Dates
HOLOCENE	Post-glaciaire	Subatlantique	-600 à aujourd'hui
		Subboréal	-4500 à -600
		Atlantique	-8900 à -4500
		Boréal	-10'500 à -8900
		Préboréal	-11'500 à -10'500
PLEISTOCENE SUPERIEUR	Tardi-glaciaire	Dryas III	-12'900 à -11'500
		Alleröd	-14'000 à -12'900
	Würm récent		
		Dryas I	-18'000 à 14'600

{ Dryas II
 -14'150 à
 -14'000

 { Bölling
 -14'600 à
 -14'150

FIG. 1.3 – Chronologie des périodes de la sortie du Würm à aujourd'hui.

Climat

Les conditions climatiques à Chasseral sont représentées à la FIG. 1.4 (source : www3). La température moyenne annuelle est de 3.2 °C et les précipitations moyennes sont de 1155 mm/an. Le nombre moyen de jours de gel (température minimale inférieure à 0 °C) est de 160, alors que le nombre moyen de jours d'hiver (température maximale inférieure à 0 °C) est de 72. Dans la combe étudiée, derrière la crête de Chasseral, les conditions sont presque similaires. Le climat est considéré comme très rude à assez froid et à tendance très humide (Burger *et al.*, 1998).

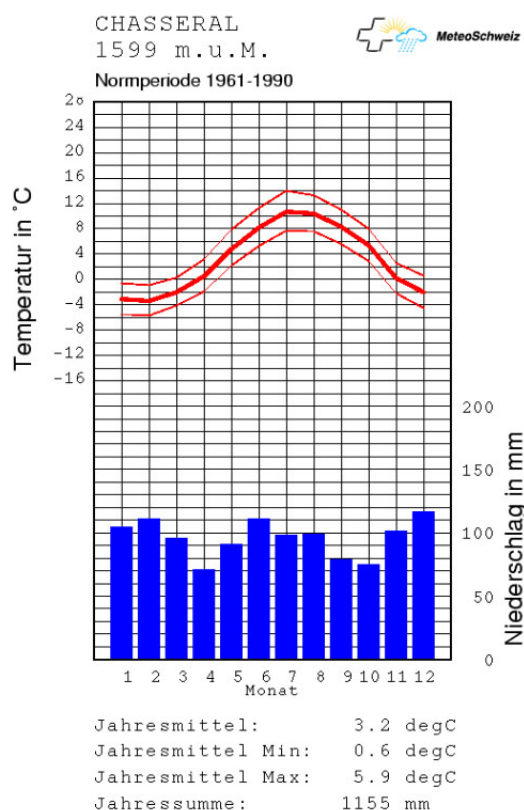


FIG. 1.4 – Climatogramme de la station de Chasseral.

Pédologie et végétation

Il existe de nombreux travaux sur le Jura à l'étage subalpin. Du côté de la pédologie, les principaux sols recensés par Gaiffe (1987) ou encore Michalet (1982) se composent de solums à pédogenèse carbonatée ou de BRUNISOLS et NÉOLUVISOLS. Dans les dolines et les endroits marneux, des sols à caractère hydromorphe se développent.

La végétation est constituée de pâturages boisés (Gallandat & Gillet, 1999), de pâturages humides et de forêts (Thiebaud, 1955; Richard, 1961). L'exploitation du massif de Chasseral est gérée par la Bourgeoisie de Bienne et l'Office des forêts du Canton de Berne situé à Tavannes. Il n'y a pas de pratiques agricoles sauf de la pâture. C'est pourquoi de nombreuses métairies y sont construites, à des distances relativement réduites. Elles tiennent un rôle important dans le paysage, à travers leur activité pastorale bovine, qui permet de maintenir l'ouverture des pâturages boisés et de pérenniser le

paysage classique des hauts du Jura.

1.2 Situation de la zone d'étude

Le site étudié se trouve entre la Métairie du Milieu de Bienne et celle de Pierrefeu sur les communes respectives de Courtelary et Cortébert (FIG. 1.5), entre les coordonnées 574'000 - 574'750 E et 221'500 - 222'300 N². L'altitude minimale est de 1300 mètres et les crêtes culminent à 1400 mètres.

La topographie accidentée est composée de deux crêtes, formées de calcaires durs du Séquanien et séparées par une combe. Cette dernière est marquée par trois talwegs plus ou moins profonds creusés principalement dans les marnes de l'Argovien.

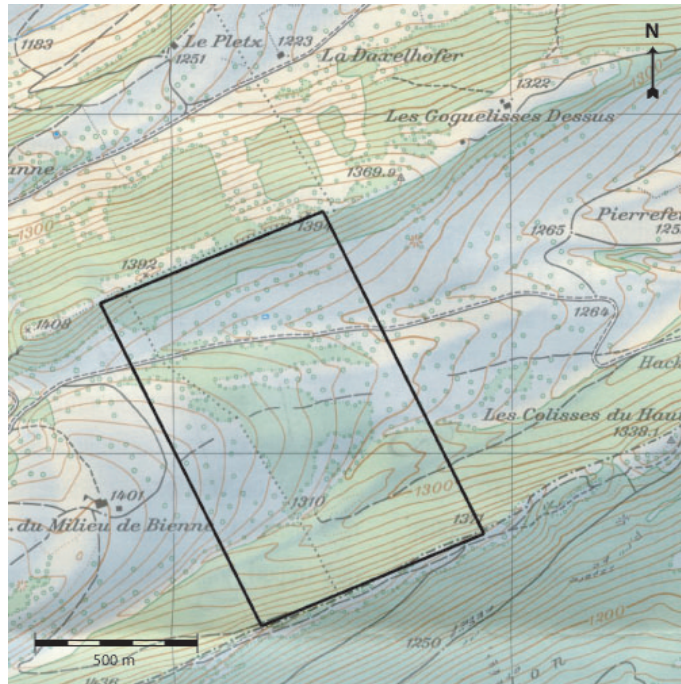


FIG. 1.5 – Carte de situation de la zone d'étude. (source : carte nationale swisstopo 1 : 25'000, n°1125)

Au milieu de la combe se trouve un mont au substrat géologique particulier qui influence le paysage et la végétation. A cet endroit, la Dalle nacrée affleurante contient des nodules de silex et ceux-ci se retrouvent en surface

²selon le système CH1903

sous forme de biefs. Ces silex sont propices au développement des plantes acidophiles comme les myrtilles et autres polytrichs qui accompagnent des épicéas centenaires. L'alliance phytosociologique est celle du *Vaccinio-Piceion*, mais l'association est impossible à déterminer comme le cite déjà Richard dans le "Rameau de sapin" (1990).

1.3 Historique

Préhistoire

Les silex de la région de Pierrefeu sont connus depuis bien longtemps. Au Paléolithique moyen, les hommes de Néandertal des cultures du Moustérien (125'000 à 30'000 BP) utilisaient ces pierres comme outils. Des silex taillés provenant de cette zone ont été retrouvés dans les sites archéologiques d'Alle (JU), de Pleigne (JU) et de Rochefort (NE) (Affolter, 2002). Par la suite, ce gisement a connu un emploi plus restreint, bien que des traces de son utilisation au Néolithique ont été retrouvées sur les sites de la Thielle (NE, environ -3'700 ans) et de Twann (BE, environ -3'050 ans).

Moyen-Age

Au Moyen-Age, la croissance de la population commençait à poser des problèmes de manque de terrains agricoles. Des surfaces supplémentaires étaient recherchées pour la pâture du bétail. Les paysans commencèrent à défricher des zones en montagne pour y faire estiver leurs troupeaux. La région du Jura appartenait à l'évêché de Bâle. Les prince-évêques, omnipotents, octroyaient alors des terres aux paysans à condition qu'ils les défrichent. Ce fut le cas pour la commune bourgeoise de Bienne, qui reçut une partie des terres dans la combe derrière la première crête de Chasseral. En 1447, les archives de la ville de Bienne font état d'une "maison sur le Chasseral", probablement la métairie du Milieu de Bienne, qui était utilisée pour le bétail et les berger-fromagers. Les pâturages n'étaient pas délimités et les troupeaux se déplaçaient également dans la forêt.

A la fin du XIVème siècle, il est attesté que Jacques de Lignièrès reçut l'autorisation de fabriquer du charbon de bois dans la région de Pierrefeu. Le produit était ensuite utilisé pour alimenter les verreries et fonderies de La Heutte (BE) et de Chaluet (SO).

XVIIIème siècle

Le déboisement intensif sur les crêtes de Chasseral pour la fabrication de charbon de bois mit à mal les forêts. La production prit fin, par manque d'arbres, et les artisans quittèrent la région. Les forêts étaient en si mauvais état qu'en 1755, le prince-évêque de Bâle décréta la première ordonnance forestale, pionnière européenne en la matière. Mais le but, protéger et revitaliser la forêt, était sans doute un peu trop ambitieux pour l'époque.

En 1798, les armées révolutionnaires françaises de Napoléon envahirent le Jura. L'évêché de Bâle et le reste du Jura suisse furent annexés à la France dans le cadre du département du Haut-Rhin. Les Français dépossédèrent les grands propriétaires et distribuèrent les terres à la population. La Bourgeoisie de Bienne fut dissoute.

XIXème siècle

En 1815, le congrès de Vienne offrit la partie suisse du département du Haut-Rhin à l'oligarchie bernoise pour services rendus à l'Alliance contre Napoléon. Pendant ce temps, la Bourgeoisie de Bienne fut reconstituée en secret. Elle rachetait petit à petit toutes les terres qu'elle avait perdues, sous le nom de "sociétaires". Un rapport sur les forêts de la ville de Bienne fut écrit en 1836 par Kasthofer. Il énonçait déjà la forêt sur silex où les épicéas et les érables poussaient difficilement et avaient peu de repousses à cause du tapis de myrtilles et de la pâture. La séparation des zones de forêt improductives et des pâturages fut proposée. Ce rapport fut la base du premier plan de gestion de l'administration forestière de la Bourgeoisie de Bienne en 1839.

Des cartes datant de 1819 montrent que, dans la région de Pierrefeu, la disposition des pâturages est sensiblement la même que celle observable aujourd'hui. Dès 1850, l'arrivée dans l'industrie du charbon provenant d'Allemagne aida à épargner les forêts locales. De nombreux épicéas furent replantés et la régénération de la forêt fut favorisée.

XXème siècle

Les séparations entre les forêts et les pâturages devinrent de plus en plus strictes avec la construction de murs en pierres sèches. Mais, dès 1980, la valeur des pâturages boisés fut remarquée et ils commencèrent à être revalorisés. La Bourgeoisie de Bienne, toujours propriétaire des forêts de Pierrefeu, exploitait également la forêt sur silex. Aux alentours de 1990, les forestiers firent des essais de rajeunissement de la zone, car très peu de relève était visible, notamment chez les épicéas. Avec des pelles mécaniques et des

tracteurs, ils raclèrent la couche de mousses et de myrtilles, afin de favoriser la reprise des jeunes arbres.

Gestion actuelle et future

La Bourgeoisie de Bienne a établi un plan de gestion forestière pour les années à venir. L'originalité de cette forêt est bien connue et aucune intervention forestière n'est prévue, mis à part les coupes sanitaires, tant que cette association végétale n'est pas mieux étudiée (Blösch *et al.*, 1991). La zone, qui fait partie du récent Parc Régional Chasseral, est également très favorable au grand tétras. Elle va devenir une réserve forestière partielle, permettant ainsi d'orienter l'exploitation dans l'intérêt de cette espèce. Le maintien et la création de clairières, l'étagement des lisières et la favorisation du sapin blanc sont des exemples de mesures qui vont être prises.

Chapitre 2

Objectifs

Afin d'étudier le paysage diversifié et les particularités de la zone, une approche multiscalaire est nécessaire. Elle permet d'intégrer les différents niveaux d'organisation qui interagissent dans la mise en place et le fonctionnement de cet environnement. La curiosité s'est tout d'abord portée sur les silex. Jouent-ils un rôle dans la formation du paysage, la pédogenèse et le développement de la végétation? Afin de répondre à ces questions, un secteur plus large que la zone à silex est pris en considération. Cet élargissement permet d'avoir des références dans le paysage jurassien classique de l'étage subalpin, à savoir les pâturages boisés et la Hêtraie à érable. Trois domaines sont étudiés et décrits : le paysage, la pédologie et les formes d'humus. A la fin de ce travail, les cartes établies, les résultats des différentes analyses et les descriptions sont mis en parallèle. Cette intégration permet alors une synthèse entre ces trois volets pour une compréhension globale du système en place. Cependant, il faut garder à l'esprit que cette alliance ne doit pas pour autant occulter la précision des recherches individuelles.

Chapitre 3

Méthodologie

La répartition des trois aspects évoqués au chapitre 2 s'est faite sur la base des intérêts personnels de chacun.

Lorraine Martignier intègre les observations au niveau de la zone d'étude toute entière en effectuant la cartographie des formations superficielles, des sols et des formations végétales.

Luc Scherrer s'occupe de la partie pédologique pure. Il établit la typologie des sols et la caractérisation des processus sur trois composants : le fer, la silice et les carbonates.

Aurélien Arnet s'intéresse à la relation entre la végétation et le sol. Elle procède à une recherche pédogénétique et essaye d'établir une classification des formes d'humus existantes, notamment sur des zones remaniées. A des échelles spatiales et temporelles différentes, ces systèmes sont étudiés, décrits, puis mis en relation. C'est à travers cette association que le concept de "biogéosciences" prend tout son sens.

Sans formuler d'hypothèses préliminaires précises, les trois travaux se fondent sur la même idée. Il s'agit tout d'abord d'une découverte du terrain d'étude, suivie de descriptions à tous les niveaux, de récolte d'échantillons et d'analyses en laboratoire. Au long de cette étude, les silex restent le fil conducteur commun.

Les chapitres suivants (4, 5 et 6) sont présentés selon un effet de zoom. Le premier prend en considération l'échelle du paysage sur une zone élargie, à savoir entre les deux crêtes¹. Le second s'étend sur la même zone mais à des lieux bien précis. Il intègre les processus généraux de pédogenèse qui s'y déroulent. Enfin le troisième concerne la forêt sur silex uniquement.

¹Voir section 1.2

Chapitre 4

Etude du paysage

4.1 Introduction

A l'échelle du paysage se posent des questions sur la combe toute entière. Quelle dynamique en a façonné le relief? D'où viennent les différents dépôts et comment ont-ils été redistribués? Quels sont les facteurs prédominants dans la compréhension actuelle du lieu? Peut-on recréer le contexte historique et paléoclimatique sur la base de traces observables aujourd'hui? La géologie, par la tectonique et le plissement du Jura, appartient encore à un échelon supérieur de temps et d'espace. Une fois les grands traits du relief modelés, l'intérêt de cette étude se porte plutôt sur la façon dont ils sont modifiés par des facteurs tels que l'eau, le gel, le vent, la gravité et la vie. Les formations superficielles semblent le meilleur moyen d'étudier ces processus du Quaternaire, de par la signature qu'ils peuvent laisser dans le paysage actuel. Déposées sur la roche substrat, les formations superficielles servent de matériau parental à la pédogenèse, qui peut également les modifier. Par dessus encore se trouve la végétation, influencée par le sol et l'influencant en retour. Au final il est très difficile de séparer ces différentes "couches" du paysage et d'identifier les facteurs permettant de passer de l'une à l'autre. Mais cette démarche est néanmoins nécessaire pour essayer de comprendre la dynamique globale, ce qui est fait dans ce travail. Formations végétales, sols et formations superficielles, tous trois font l'objet d'une étude propre. Puis des liens sont recherchés, ainsi que des zones d'exclusivité et des facteurs prépondérants. Le tout est lié à l'exploitation de l'homme, dont la présence depuis des siècles a laissé des traces certaines dans le paysage.

4.1.1 Les formations superficielles

Cette couche du paysage est assez méconnue des géologues et des pédologues. C'est pourquoi elle fait ici l'objet d'une petite introduction.

Les formations superficielles sont "des formations continentales meubles ou secondairement consolidées provenant soit de l'altération chimique ou biochimique (altérites) soit de la désagrégation mécanique (clastites) de roches préexistantes" (Joly, 1997). Elles se situent donc entre la roche géologique et le sol et servent souvent de matériau parental à celui-ci. La répartition actuelle des formations superficielles témoigne de la dynamique du relief. En effet, l'eau, le vent, la gravité, le gel redistribuent les éléments en laissant des traces identifiables.

Pour l'étude des formations superficielles, il faut prendre en compte ce qui se trouve entre 0 et 25 cm, entre 25 et 75 cm, puis au-delà de 75 cm de profondeur. Dans la plupart des cas, l'identification du système morphogénique de mise en place est réalisée directement sur le terrain. L'observation de la texture de la terre, de sa couleur, de son pH, ainsi que la topographie et la géologie du lieu suffisent souvent pour établir un diagnostic. Cependant, des analyses complémentaires au laboratoire sont parfois nécessaires. Les analyses granulométriques sur la terre fine (fraction < 2 mm) peuvent être révélatrices de l'environnement de dépôt de l'échantillon. En effet, les différentes dynamiques qui ont modelé le paysage contribuent à redistribuer les particules au sein du milieu et chacune laisse une signature reconnaissable. Les analyses minéralogiques sont également importantes dans certains cas, afin d'identifier d'éventuels dépôts allochtones.

Le vent, par exemple, est un très bon agent de tri. Seuls les grains d'une certaine classe de diamètre sont emportés. Ensuite, les particules plus lourdes sont déposées avant les plus légères, qui continuent leur chemin. Un dépôt d'éléments éoliens présente alors une courbe de répartition des diamètres des grains de type leptokurtique. Les loess du Jura en sont un bon exemple (Pochon, 1973, 1978) et des limons d'origines distinctes sont discernables par leur diamètre moyen. Le ruissellement diffus le long des pentes n'a pas cette action de tri sur les particules. Au contraire, l'eau emporte à peu près tout le matériau fin qu'elle rencontre. Avec une analyse granulométrique, une courbe platykurtique est obtenue. L'altération de la roche-mère peut être une autre source de particules fines. Les calcaires, selon leur nature, peuvent libérer plus ou moins d'argiles, qui appartiennent à des classes granulométriques précises.

4.2 Objectifs

Les objectifs de ce chapitre à l'échelle du paysage s'inscrivent dans un but de description générale et de compréhension du lieu. Des hypothèses précises ne sont pas formulées. Les axes de recherche sont l'identification des processus de mise en place du paysage pendant le Quaternaire, l'étude de la dynamique actuelle et l'explication de la répartition des structures observables, en combinant les facteurs environnementaux et humains. L'accent est mis sur les formations superficielles et notamment les silex et les loess.

4.3 Méthodologie

Les différentes couches du paysage sont étudiées séparément par la cartographie. Les formations végétales, les sols et les formations superficielles font l'objet de cartes distinctes. La carte géologique, déjà levée par Aufranc (1985), est utilisée comme point de départ. Les formations végétales ne demandent pas une détermination très pointue et sont donc aisées à reconnaître. Le fonctionnement des sols est traité au chapitre 6. En revanche, pour compléter l'étude des formations superficielles, des analyses supplémentaires sont parfois nécessaires. Des analyses granulométriques sont effectuées afin de caractériser les environnements de dépôt. Des analyses minéralogiques des argiles aux rayons X sont utiles pour confirmer la présence de loess, en confrontant les résultats avec la littérature (Adate, 2000; Havlicek & Gobat, 1996; Havlicek, 1999; Pochon, 1973, 1978).

La comparaison des couches entre elles a pour but de faire ressortir des relations fortes ou des zones d'exclusivité. Les cartes sont une étape à cette réflexion. D'un autre côté, des observations ponctuelles et des sondages effectués sur le terrain sont traités statistiquement. Ils permettent d'apporter des confirmations ou infirmations aux interprétations obtenues avec les cartes.

Une description plus précise de la végétation d'une zone choisie est effectuée. L'étude des alliances phytosociologiques présentes illustre la diversité de l'endroit, qui ne fait que confirmer l'intérêt de cette combe. Une comparaison est également faite entre les observations réalisées à l'échelle de toute la zone d'étude et celles faites plus précisément sur un seul versant.

4.4 Matériel & Méthodes

4.4.1 Prise de contact avec le lieu d'étude

Le travail sur le terrain se déroule principalement durant l'été et l'automne 2006. Au départ, nous arpentons la zone afin de nous familiariser avec les éléments présents. Nos principaux outils sont la carte géologique (Aufranc, 1985), une tarière, de l'acide chlorhydrique, un pH-mètre Hellige et des crayons de couleur.

Des sondages à la tarière sont effectués pour observer les sols et les formations superficielles. Au fil du temps, nous nous approprions le lieu. Au bout de deux semaines, les premières minutes de terrain sont réalisées. Imprécises et incomplètes, elles permettent néanmoins de définir une méthode de travail.

4.4.2 Sur le terrain : prise de données et échantillonnage

La combe en question est parallèle à un pli géologique et une certaine symétrie est observable sur les deux versants (FIG. 1.2). La même tendance étant observée de chaque côté (géologie, topographie, végétation), il est décidé de faire trois transects perpendiculaires à l'axe de la combe (annexe A.1). Ils sont parallèles entre eux, orientés nord-nord-ouest et vont d'une crête à l'autre. Le long de ces lignes, des relevés sont effectués de façon préférentielle selon la topographie, le type de végétation, le colluvionnement apparent. A chaque arrêt, un sondage est réalisé afin de déterminer le type de sol, la profondeur et les formations superficielles. Très souvent, des tests à *HCl* et au pH-mètre Hellige sont nécessaires pour établir un diagnostic. Un GPS indique les coordonnées géographiques, ainsi que l'altitude. Une feuille de données préétablie est remplie. Elle comprend les rubriques suivantes : numéro du sondage, coordonnée X, coordonnée Y, altitude, formation végétale, topographie, géologie, type de sol et profondeur, formation superficielle 1, formation superficielle 2, remarques (annexe A.2).

Lorsque des informations supplémentaires semblent nécessaires pour déterminer le type de formation superficielle, des échantillons de terre de 50 à 100 g sont prélevés. Ils servent ensuite à effectuer les analyses granulométriques fines et les analyses minéralogiques aux rayons X.

4.4.3 Réalisation des cartes

Les cartes sont tout d'abord réalisées au crayon, directement sur le terrain. Des agrandissements de la carte topographique¹ servent de fond de carte.

¹carte nationale swisstopo 1 :25'000, n°1125 Chasseral

En suivant les transects déterminés, les zones observées sont marquées sur les cartes par des codes de couleur. Ensuite, si des correspondances d'un transect à l'autre sont remarquées, il est possible d'extrapoler ce qu'il y a entre deux et de dessiner des plages complètes. Lorsque des inégalités ou des doutes apparaissent, il est nécessaire de retourner à l'endroit précis sur le terrain afin de pouvoir compléter la carte. Dans certaines zones, un transect supplémentaire peut être décidé, perpendiculairement aux trois d'origine, afin de confirmer les extrapolations des cartes.

Les catégories choisies pour la cartographie des formations végétales sont descriptives (pâturages boisés, forêt de feuillus, prairie humide, etc). Les couleurs utilisées sont inspirées de la carte phytosociologique du canton de Neuchâtel (source [www1](#)).

Pour les sols, la détermination est fondée sur le *Référentiel pédologique* (AFES, 1995) et la *Clé de sol* (Gobat & Havlicek, 1996). Les couleurs sont choisies arbitrairement.

En ce qui concerne les formations superficielles, le *Glossaire de géomorphologie* de Joly (1997) donne toutes les conventions. A chaque domaine morphogénique est attribué une couleur précise selon la charte PANTONE[®]. Les différentes formations superficielles et les éléments géomorphologiques sont représentés par des symboles, dans la couleur correspondant au domaine de mise en place. Plusieurs zones de symboles peuvent se superposer si c'est nécessaire. Le substrat géologique est aussi représenté par un fond sur lequel peuvent être appliqués des symboles. La profondeur des formations est importante et est représentée en atténuant ou renforçant la couleur de la zone. Les limites sont fixées à 25 et 75 cm depuis la surface. Si elles ont une épaisseur de moins de 25 cm, les formations superficielles ne sont pas prises en compte et seul le substrat, dominant, est représenté par une teinte forte. Entre 25 et 75 cm de profondeur, plusieurs formations peuvent être représentées par leur symbole directement sur la couleur du substrat, cette fois atténuée. Pour une épaisseur de plus de 75 cm, la ou les formations superficielles sont représentées sans le substrat.

Une fois les minutes de terrain terminées, les cartes sont reproduites à l'ordinateur en utilisant le programme Adobe Illustrator[®].

4.4.4 Analyses granulométriques

Cette méthode fait l'objet d'un rapport complet mis en annexe (A.3). Seules les grandes lignes sont expliquées ici.

Le protocole de laboratoire est fondé sur celui de Chalumeau (2003). Il est modifié selon des besoins spécifiques. Les échantillons de terre prélevés sur le terrain doivent tout d'abord être préparés en trois étapes : décarbon-

atation, destruction de la matière organique et défloculation. Les analyses granulométriques proprement dites se font en deux parties : un tamisage humide jusqu'à $50 \mu\text{m}$, puis une diffraction laser sur les particules plus fines. Ensuite, des indices sont calculés afin de pouvoir interpréter les résultats : moyenne, médiane, classement (*sorting*), asymétrie (*skewness*), kurtose et indice de bimodalité.

Par la suite, des traitements statistiques sont réalisés pour comparer les échantillons entre eux. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) et une analyse en composante principale (ACP) sont réalisées avec le logiciel Matlab[©].

4.4.5 Analyses minéralogiques des argiles

Suite aux résultats des analyses granulométriques, des échantillons spécifiques à une dynamique donnée sont choisis. Quand cela est possible, un échantillon de la roche sous-jacente est également analysé, afin de pouvoir comparer le matériau autochtone à celui de l'échantillon.

Le protocole utilisé est celui mis au point par Cattin (1998). Les échantillons de terre ou de roche concassée subissent une décarbonatation à HCl , accélérée par un bain aux ultra-sons. Les échantillons sont ensuite lavés par centrifugation. Puis, les fractions $< 2 \mu\text{m}$ et de $2-16 \mu\text{m}$ de diamètre sont séparées par une succession de centrifugations et d'agitations (loi de Stokes). Les suspensions ainsi obtenues sont finalement coulées sur des verres de montre. Une fois secs, ils sont passés dans une machine qui les bombarde de rayons X. Les différents minéraux présents diffractent ces rayons selon un angle qui leur est propre, en fonction de leur réseau cristallin. L'intensité des rayons captés par le détecteur pour chaque angle permet d'obtenir un spectre pour l'échantillon. L'unité de mesure est en coups par seconde (CPS). Les minéraux sont identifiables par leur(s) pic(s) dans le spectre total. Cette méthode n'est pas quantitative, mais elle permet de calculer des rapports entre certains minéraux présents.

4.4.6 Traitement statistique des observations de terrain

Les données sources sont collectées sur le terrain. Les observations des sondages sont utilisées (annexe A.2) et six facteurs sont choisis pour être étudiés : végétation, topographie, géologie, type de sol², profondeur de sol et formations superficielles. Chaque facteur contient plusieurs variables. Les

²Certains types de sol déterminés sur le terrain ne sont pas confirmés par des analyses en laboratoire et n'apparaissent pas sur les cartes. C'est le cas notamment des CALCISOLS, RANKOSOLS et NÉOLUVISOLS.

données sont sous la forme d'un tableau Excel variables/observations. Le logiciel utilisé est XLSTAT[©].

Une analyse des correspondances multiples (ACM) est effectuée. Elle sert à représenter graphiquement l'association entre les modalités, aussi appelées catégories, d'au moins deux variables qualitatives. Elle permet d'aboutir à des cartes de représentation sur lesquelles sont observables les proximités entre les catégories des variables qualitatives (source : www5).

Les graphiques sont ensuite réalisés avec Matlab[©] pour une meilleure visualisation.

4.4.7 Etude d'une zone choisie

En fonction des résultats obtenus par les méthodes décrites jusqu'ici, une zone de surface restreinte (environ 30 x 100 m) est choisie pour être étudiée plus à fond au printemps et en été 2007. L'accent est mis sur l'étude des alliances végétales. Une cartographie fine est réalisée et chaque zone de végétation est caractérisée par un type de sol et de formations superficielles.

Le tracé est délimité à l'aide d'une chevillière et d'une boussole. Les différents types de végétation identifiés font l'objet d'un relevé floristique, afin de pouvoir les rattacher à une alliance phytosociologique, selon le *Guide des milieux naturels de Suisse* (Delarze *et al.*, 1999) et la *Végétation de la Suisse, guide syntaxonomique* (Gallandat *et al.*, 2006). Dans chaque zone de végétation, un sondage à la tarière est effectué, afin de déterminer le type de sol, sa profondeur et le type de formations superficielles. Pour établir la topographie de l'endroit sur un transect, un télémètre laser est utilisé, accompagné d'un double-mètre et d'un niveau de chantier.

4.5 Résultats

4.5.1 Les cartes

Les cartes elles-mêmes sont un résultat et elles sont brièvement décrites ici.

Formations végétales

Cinq catégories sont définies : forêt de feuillus, forêt de conifères, pâturage boisé, prairie humide et mégaphorbiaie. La tendance sèche ou humide est également marquée en surimpression lorsqu'elle est observable.

Les forêts sont en général cantonnées là où la pente est la plus forte, ainsi qu'au sommet du mont central. Les zones plus plates sont exploitées sous

forme de pâturages boisés. Des endroits plus humides (prairies et forêts) sont remarquables sur le bas des versants. La forêt de conifères est localisée sur le mont au centre de la combe, ainsi que sous forme de bandes sur le versant au sud.

Sols

Les types de sol suivants sont observés : RENDOSOL, CALCOSOL, ORGANOSOL CALCIQUE, BRUNISOL SATURÉ ou MÉSOSATURÉ, PODZOSOL OCRIQUE ou MEUBLE, RÉDOXISOL, RÉDUCTISOL TYPIQUE, LITHOSOL et BRUNISOL-RÉDOXISOL. Quelques rares CALCISOLS et NÉOLUVISOLS sont déterminés par des sondages (annexe A.2), mais une confirmation par des analyses serait nécessaire. Dans le doute et étant donné le peu de cas observés, ils ne sont pas cartographiés. Certaines zones présentent des mosaïques de plusieurs types de sols et nécessitent des symboles spéciaux afin de faciliter la lisibilité de la carte. Des sondages à la tarière ne sont pas réalisables dans les silex. Dans l'impossibilité de déterminer les types de sols, toute la zone est définie comme constituée de "sols à pédogenèse acide avec squelette de silex". Trois profils sont néanmoins creusés et des PODZOSOLS OCRIQUES sont identifiés. Ils sont indiqués sur la carte par des symboles individuels. Une autre zone, comprenant les lapiés et le reste du versant du mont, est caractérisée par une mosaïque de sols différents. La couleur de fond reste celle des LITHOSOLS, car ils sont dominants. Les autres types de sol identifiés (BRUNISOL SATURÉ ou MÉSOSATURÉ, ORGANOSOL CALCIQUE, CALCOSOL, RENDOSOL) sont représentés par des symboles dans la couleur appropriée.

Les sols plutôt minces (CALCOSOL, LITHOSOL, RENDOSOL) se trouvent dans les pentes les plus fortes ou sur des calcaires durs. Au contraire, les sols plus épais (RÉDOXISOL, RÉDUCTISOL, BRUNISOL-RÉDOXISOL, PODZOSOL) ne sont localisés que dans des endroits à pente faible, comme en bas de versant ou au sommet du mont central. Des PODZOSOLS sont observés dans un épais squelette de silex sur la bosse centrale, ainsi que ponctuellement dans le versant au sud.

Cette carte est la plus complexe et comprend encore de nombreuses imperfections par rapport à la réalité du terrain. Celles-ci sont dues notamment à l'échelle d'étude qui entraîne nécessairement un choix de ce qui est représenté ou ne l'est pas. Les limites entre les zones sont illustrées ici par des transitions nettes entre différents types de sol. Il va de soi que ce n'est pas le cas dans la nature car le sol est un continuum. Ces limites sont donc arbitraires et liées aux décisions de l'auteur des cartes.

Formations superficielles

Les systèmes morphogéniques identifiés sont l'action diffuse des eaux, le système périglaciaire, le système fluvial et le domaine karstique. La roche substrat, uniquement du calcaire, est représentée en fonction de la profondeur. Les différentes formations superficielles observées sont appliquées sous forme de symboles : des blocs calcaires en place, des clastites, des colluvions de blocs, du ruissellement diffus de particules fines et des biefs à silex³. Certains éléments géomorphologiques sont également marqués, comme les talwegs, dolines, niches de décollement, bourrelets de solifluxion et lapiés.

Sur la carte, une certaine symétrie entre les deux versants est observable. En haut des pentes, où elles sont les plus fortes, se trouvent des colluvions sur la roche calcaire, ainsi que des particules fines ruisselées. Un peu plus bas, quand les pentes deviennent moins raides, il n'y a plus de colluvions, mais des blocs calcaires en place et de la terre fine. Tout en bas des versants, l'action diffuse des eaux est moins forte de par la diminution de la pente et les particules peuvent s'accumuler, parfois sur plus de 75 cm d'épaisseur. Des silex se trouvent sur le mont au centre de la combe. Ils sont représentés par le fond du système périglaciaire, car leur épaisseur peut aller jusqu'à un mètre. Cependant, la profondeur du dépôt n'est pas mesurée partout et est probablement moindre sur les côtés de la bosse. La couleur du système périglaciaire devrait donc apparaître atténuée et du ruissellement diffus ou même des loess en place pourraient se trouver sous les silex. Mais, pour une raison de lisibilité et à cause de l'incertitude de l'étendue des zones, il est décidé de n'illustrer le fond qu'avec le système périglaciaire⁴. Les clastites indiquent que les cailloux sont fragmentés par l'action du gel et la notation du bief à silex spécifie la minéralogie. Les symboles des colluvions indiquent qu'une partie de ces cailloux descend le long des flancs du mont à cause de la pente. En effet, des silex se retrouvent jusque dans les talwegs des deux côtés. Une autre bande contenant des silex est observable sur une plus petite bosse au sud, et ce sur toute la largeur de la zone étudiée. Ils sont cependant en beaucoup plus faible quantité. Bien que les loess forment une grande quantité des particules fines ruisselées, aucun dépôt d'origine n'est confirmé. C'est pourquoi le système morphogénique éolien n'est pas représenté sur la carte. Ils auraient pu se trouver au sommet des crêtes, mais cette hypothèse n'est pas confirmée par les analyses. Il est possible que les loess présents sur le sommet du mont central soient en partie en place. Dans le doute, c'est tout de même le ruissellement diffus de particules fines qui est choisi pour la cartographie.

³"formation à silex brisés par cryoclastie" (Joly, 1997)

⁴La zone à silex et ses dynamiques propres sont détaillées au chapitre 8.

Un grand nombre de dolines sont observables dans la zone étudiée, principalement le long des talwegs ou en bas de pente. Elles semblent toujours être disposées en ligne. Egaleme nt liés aux phénomènes karstiques, des lapiés sont identifiés sur un des flancs du mont. Sur les deux versants de la combe, des phénomènes de solifluxion sont observés. Sur le versant au nord, de gros bourrelets de solifluxion se trouvent sur le bas de la pente, avançant sur le talweg. Sur le côté sud, la solifluxion se fait sous la forme d'un pli, parfois double, qui longe tout le versant. Ces "bourrelets à myrtilles", comme nous les surnommons (FIG. 4.1), montrent une accumulation de particules fines de plus de 75 cm de profondeur.



FIG. 4.1 – Un bourrelet de solifluxion sur le versant sud, surnommé "bourrelet à myrtille".

4.5.2 Les analyses granulométriques

La liste des échantillons utilisés et leur provenance sont mis en annexe A.4 à A.9, de même que les résultats complets des analyses granulométriques, les scripts des traitements sur Matlab[©] et la signification des indices calculés (Folk & Ward, 1957).

Les classes granulométriques sont transformées selon l'échelle des phi. Cette échelle logarithmique en base 2 consiste en une série d'intervalles de classes qui ont une relation constante les unes avec les autres (Pettijohn *et al.*, 1973). La formule est la suivante⁵ (les classes sont en μm) : $\phi = \frac{-\log_{10}(\text{classe})}{\log_{10}(2)}$.

⁵Les correspondances entre l'échelle micrométrique et celle des phi sont présentées dans l'annexe A.3.

Indices granulométriques

Les moyennes se situent entre 4.5ϕ et 7.1ϕ et les médianes entre 4.8ϕ et 7.2ϕ . Leur répartition est la suivante⁶ :

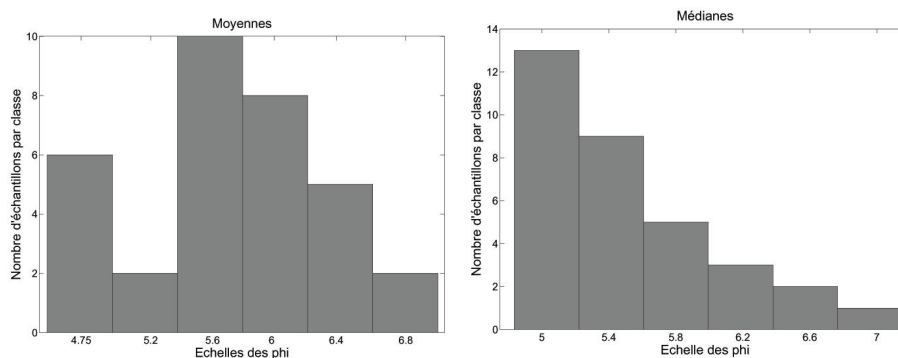


FIG. 4.2 – Répartition des moyennes (à gauche) et des médianes (à droite) selon 6 classes.

Les valeurs de l'indice de classement se situent entre 1.08 et 2.46, ce qui signifie que tous les échantillons sont médiocrement à très mal classés. L'asymétrie, entre 0.22 et -0.47, montre qu'il y a tous les types d'asymétrie. La kurtose varie entre 0.84 et 1.9. Elle indique qu'il y a peu de courbes platykurtiques. La plupart des courbes sont considérées comme mésokurtiques à leptokurtiques. L'indice de bimodalité va de 0.66 à 1 (unimodal).

Classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est effectuée sur les résultats des calculs d'indices (annexe A.9), en utilisant la distance euclidienne. Deux modes d'agglomération sont testés : selon Ward et selon la moyenne. Les coefficients cophénétiques calculés sont de 0.71 pour Ward et de 0.80 pour la moyenne. C'est donc l'agglomération selon la moyenne qui est préférée (annexe A.10).

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est réalisée directement avec les valeurs des indices. La matrice de corrélation (annexe A.10) est calculée et donne une valeur de 0.93 entre la moyenne et la médiane et une valeur de 0.82 entre le sorting et le skewness.

⁶le nombre de classes est déterminé selon la loi de Yule

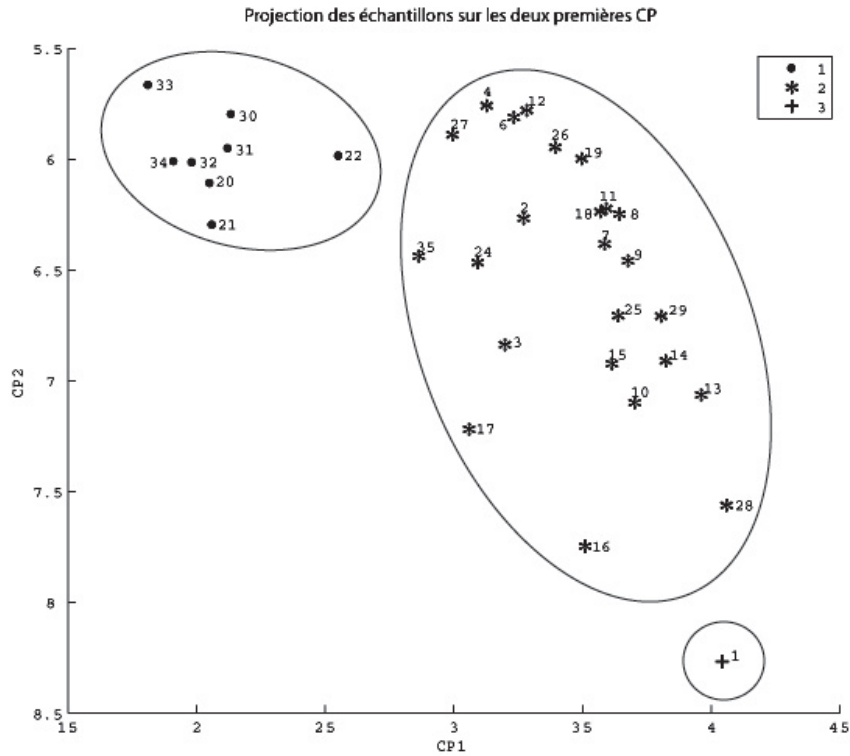


FIG. 4.3 – Projection des échantillons sur les deux premières composantes principales. Les trois groupes obtenus avec la CAH sont visibles.

Les valeurs propres indiquent que les deux premières composantes principales (CP) portent 83% de la variance des échantillons (annexe A.10). En reportant les variables sur le cercle des corrélations d'après les CP1 et CP2, il apparaît que toutes les variables sont situées sur le bord du cercle. Elles sont donc fortement significatives. La moyenne et la médiane sont proches. Le classement et l'asymétrie sont très proches également et sont à l'opposé de l'indice de bimodalité. La kurtose porte la CP1.

Les échantillons sont projetés eux aussi selon les deux premières composantes principales. En reprenant les résultats de la CAH, il est décidé de faire apparaître trois groupes (FIG. 4.3).

4.5.3 Les analyses minéralogiques

Les résultats bruts des analyses minéralogiques aux rayons X se trouvent en annexe A.11. Les pourcentages relatifs de certains éléments sont présentés

ci-dessous (TAB. 4.2 et TAB. 4.3). Cependant, comme tous les minéraux ne peuvent pas être mesurés quantitativement, les 100% exprimés ne correspondent pas à la totalité des minéraux présents dans l'échantillon, mais bien à ceux dont la mesure est comparable. Les autres sont exprimés en CPS (coups par seconde) et des comparaisons entre les différents échantillons ne peuvent être faites qu'au sein de chaque minéral.

Provenance des échantillons

L'emplacement des sondages et fosses pédologiques où les échantillons sont prélevés est indiqué sur la carte en annexe A.5. Une description succincte est présentée dans le TAB. 4.1⁷.

TAB. 4.1 – Provenance et description des échantillons analysés. (Les appellations "PODZOSOL" et "BRUNISOL" indiquent ici que le solum appartient en réalité au grand ensemble de référence des PODZOSOLS, respectivement des BRUNISOLS, d'après le *Référentiel pédologique* (AFES, 1995).)

N°(analyse)	Sondage/Sol	Type de sol	Situation	Horizon	Profondeur
1	sondage 1	BRUNISOL	crête N	?	30-40 cm
12	sondage 118	PODZOSOL	bourrelet	?	30-40 cm
13	sondage 118	PODZOSOL	bourrelet	?	80-100 cm
20	sol 7 (7-4)	PODZOSOL	sur silex	BPs1	19-58 cm
21	sol 7 (7-5)	PODZOSOL	sur silex	BPs2	58-81 cm
23	roche	Dalle nacrée			
30	sol 6 (6-1)	PODZOSOL	sur silex	AE	5-68 cm
31	sol 6 (6-2)	PODZOSOL	sur silex	BPh	68-95 cm
32	sol 6 (6-3)	PODZOSOL	sur silex	BPsIIS	95-136 cm
33	sol 6 (6-4)	PODZOSOL	sur silex	BPsIIS	95-136 cm
34	sol 6 (6-5)	BRUNISOL	paléosol	IIS	136-147 cm
35	sol 6 (6-6)	BRUNISOL	paléosol	II(I) β	147-166 cm

Minéraux mesurés

Les minéraux identifiés et mesurés avec cette méthode peuvent être répartis en trois groupes en fonction de leur provenance (d'après T. Adatte, communication orale) :

⁷Les noms des horizons sont repris du chapitre 5.

Autochtonie La kaolinite et les micas sont des produits argileux issus de l'altération de la roche calcaire. Le quartz peut également être trouvé dans les calcaires et sa proportion varie selon les roches étudiées. Les feldspaths potassiques proviennent de roches du Jura ou des Alpes. Dans notre cas, ils peuvent être aussi bien autochtones qu'allochtones. Quelques chlorites peuvent être observées dans des roches calcaires, mais en très faible quantité.

Allochtonie De grandes quantités de chlorite et de plagioclase se trouvent dans les roches alpines. Dans le contexte jurassien, ils constituent les principaux minéraux allochtones. Une partie des feldspaths potassiques peut potentiellement être allochtone. L'amphibole est également d'origine alpine. En faible quantité dans les loess, sa présence dans les sols jurassiens indique une composante éolienne.

Transformation, néoformation Les micas présents dans la roche calcaire subissent une altération au cours du temps par la pédogenèse, dont le résultat final est la smectite. Cependant, des dégradations incomplètes entraînent la formation de complexes fer-aluminium, appelés hydroxy-Al-Fe. La lépidocrocite et la goethite peuvent être néoformées dans les sols dans des conditions spéciales. Toutes deux contiennent du fer et dépendent de ses différents états d'oxydation ou de réduction.

Le rapport plagioclase/feldspath potassique (Pla/FK) indique l'importance du matériau allochtone (plagioclase) par rapport à un autre matériau pouvant être autochtone (feldspath potassique). Dans le cas de loess, une quantité de plagioclase nettement plus grande que de feldspath potassique témoigne de l'origine des massifs cristallins alpins, alors que la tendance inverse révèle une provenance des socles hercyniens des Vosges ou de la Forêt Noire (Adatte, 2000).

Fraction 2-16 μm

L'échantillon 1 contient beaucoup de micas (51%) et de kaolinite (29%). Une certaine quantité de chlorite (20%) et de plagioclase est remarquée. Le rapport Pla/FK est inférieur à 1.

Les échantillons 12 et 13 présentent les plus grandes quantités de kaolinite (39% et 34%) et de feldspaths potassiques (293 et 150 CPS). Leur teneur en micas est également importante (40% et 31%), ainsi que celle en hydroxy-Al-Fe (18% et 25%). En revanche, il y a peu de chlorite présente et le rapport Pla/FK est inférieur à 1. L'échantillon 12 se démarque par la présence de lépidocrocite et la plus haute teneur en quartz mesurée.

Les échantillons 20 et 21 ont une très grande teneur en chlorite (58% et

46%), ainsi qu'en plagioclase. Le rapport Pla/FK est supérieur à 1 (8.74 pour l'échantillon 20 et 1.21 pour l'échantillon 21). Les teneurs en kaolinite sont basses (7% et 8%). Des hydroxy-Al-Fe sont également présents.

L'échantillon 23 contient presque exclusivement des micas (87%). Un peu de chlorite (13%) et de plagioclase sont observés. C'est également un des trois seuls échantillons à présenter de la goethite dans la fraction 2-16 μm . L'absence de feldspaths potassiques rend le calcul du rapport Pla/FK impossible. La kaolinite et les hydroxy-Al-Fe sont également absents.

L'échantillon 30 contient presque 60% de micas. La chlorite est bien représentée (28%). Seuls 13% de kaolinite sont mesurés et le rapport Pla/FK vaut 1.

TAB. 4.2 – Pourcentage relatif de certains minéraux dans la fraction 2-16 μm .

N°(analyse)	Hydroxy-Al-Fe	Micas	Kaolinite	Chlorite	Pla/FK
1	0	51.2	29.28	19.52	0.57
12	17.58	39.93	39.14	3.35	0.26
13	25.24	31.03	34.33	9.4	0.64
20	19.9	15.17	6.94	57.99	8.74
21	11.76	34.41	7.74	46.09	1.21
23	0	87.3	0	12.7	-
30	0	59.28	13.1	27.61	1.01
31	5.01	37.09	8.14	49.76	1.33
32	0	34.55	10.03	55.42	1.53
33	8.58	27.43	7.07	56.93	2.5
34	7.96	34.69	8.55	48.79	3.11
35	65.37	14.79	7.4	12.44	0.39

L'échantillon 31 a de grandes quantités de chlorite (50%) et de micas (37%). Peu de kaolinite (8%) et d'hydroxy-Al-Fe (5%) sont mesurés. Le rapport Pla/FK est de 1.3.

Les échantillons 32 à 34 présentent tous une forte teneur en chlorite (entre 49% et 57%) et en plagioclase. Leur rapport Pla/FK est supérieur à 1, avec un maximum de 3.1 observé dans l'échantillon 34. La quantité de micas mesurée se situe entre 27% et 35% et peu de kaolinite est décelée (entre 7% et 10%). Des amphiboles sont remarquées. Elles sont plus abondantes dans l'échantillon 33 (42 CPS) que dans les n°32 et 34 (respectivement 17 et 28 CPS). L'échantillon 34 contient de la goethite. Un peu d'hydroxy-Al-Fe est mesuré dans les échantillons 33 (9%) et 34 (8%), mais ils sont absents de l'échantillon 32.

L'échantillon 35 a la teneur la plus élevée en hydroxy-Al-Fe (65%). Peu de plagioclases sont mesurés et le rapport Pla/FK est inférieur à 1. La présence de goethite est également observée.

Fraction $< 2 \mu\text{m}$

L'échantillon 1 contient beaucoup de micas (31%) et de kaolinite (38%). Des hydroxy-Al-Fe sont observés (22%), ainsi que de faibles quantités de chlorite (9%). Il n'y a pas de goethite détectée.

Les échantillons 12 et 13 présentent principalement des micas, de la kaolinite et des hydroxy-Al-Fe. De la goethite est détectée. La chlorite est également peu représentée (8%). L'échantillon 12 est le seul à contenir de la lèpidocrocite.

Les échantillons 20 et 21 contiennent une majorité d'hydroxy-Al-Fe (53% et 56%). Des micas sont présents (21% et 16%), mais relativement peu de kaolinite (13% et 12%). De la chlorite est mesurée (13% et 15%).

TAB. 4.3 – Pourcentage relatif de certains minéraux dans la fraction $< 2 \mu\text{m}$.

N°(analyse)	Smectite	Hydroxy-Al-Fe	Micas	Kaolinite	Chlorite
1	0	22.01	30.82	38.16	9.01
12	0	20.6	15.7	55.56	8.13
13	0	10.46	42.81	38.74	7.99
20	0	52.55	21.32	12.75	13.37
21	0	56.34	16.43	12.04	15.19
23	0	27.71	72.29	0	0
30	0	5.91	29.96	58.64	5.5
31	0	0	33.81	35.39	30.80
32	0	30.12	31.33	16.45	22.10
33	0	22.30	40.29	13.47	23.94
34	0	27.32	48.63	8.36	15.68
35	36.3	35.1	12.26	16.35	0

L'échantillon 23 a la plus haute teneur en micas (72%). Les autres 28% sont identifiés comme des hydroxy-Al-Fe. Cet échantillon est celui qui présente le plus de goethite dans cette fraction.

L'échantillon 30 contient beaucoup de kaolinite (59%) et de micas (30%). Très peu de chlorite et d'hydroxy-Al-Fe sont présents. Comme les échantillons 1 et 31, il ne présente pas de goethite.

L'échantillon 31 ne contient pas de goethite ni d'hydroxy-Al-Fe. Les teneurs relatives en micas (34%), kaolinite (35%) et chlorite (31%) sont presque équivalentes.

Les échantillons 32 à 34 contiennent une majorité de micas (entre 31% et 49%). Les hydroxy-Al-Fe (entre 22% et 30%) et la chlorite (entre 16% et 24%) sont également importants. Les quantités de kaolinite sont moindres (de 8% à 16%).

L'échantillon 35 est le seul à présenter des smectites (36%). Il contient également beaucoup d'hydroxy-Al-Fe (35%), ainsi que des micas (12%) et de la kaolinite (16%). La chlorite, en revanche, n'y est pas détectée.

4.5.4 Les analyses statistiques des observations de terrain

Les résultats obtenus avec l'ACM sont visualisés sous forme de graphiques. Les deux premières composantes principales, qui expliquent 52% de la variance totale, sont choisies pour la FIG. 4.4. La projection des variables selon les composantes principales 1 et 3 (46% de la variance expliquée) et les contributions des différentes variables à la construction des axes se trouvent en annexe A.12.

Les remarques sont faites ici selon la Fig.4.4. Les variables sont disposées un peu différemment sur la figure en annexe, mais dans l'ensemble les mêmes groupes sont observables et les tendances sont généralement confirmées. Les codes des variables utilisés sur les graphiques sont expliqués en annexe A.13.

Trois groupes distincts sont observables, chacun autour d'une variable géologique différente, à savoir les calcaires durs ('Géol-1'), les marnes ('Géol-2') et les silex ('Géol-3').

Le groupe autour des silex contient les variables suivantes : 'PODZOSOL', 'forêt de conifères et myrtilles', 'formations superficielles de plus de 75 cm de silex', 'replat et bourrelet à myrtilles'. La 'FS-8'⁸ et la 'FS-1', qui contiennent toutes deux des silex, ne sont pas disposées très loin du groupe.

Dans le groupe des marnes, on peut observer les variables suivantes : 'bas de pente', 'RÉDUCTISOL', 'prairie humide', 'sol plus de 75 cm de profond' et 'ruissellement diffus sur plus de 75 cm'.

Le dernier groupe, autour des calcaires durs, est constitué d'un gros ensemble de variables. Il est néanmoins possible de distinguer, à une des extrémités, un groupe avec les variables 'pente de 50 à 60%', 'pente plus grande que 65%', 'CALCISOL', 'LITHOSOL', 'RANKOSOL', 'RENDISOL', 'formations superficielles avec blocs calcaires et colluvions sur dalle calcaire' et 'profondeur de sol de moins de 10 cm'.

À l'autre extrémité, les variables suivantes sont observables : 'NÉOLUVISOL', 'RÉDOXISOL', 'BRUNISOL-RÉDOXISOL', 'profondeur de 60 à 70 cm', 'forma-

⁸La notation 'FS' correspond à 'formations superficielles'.

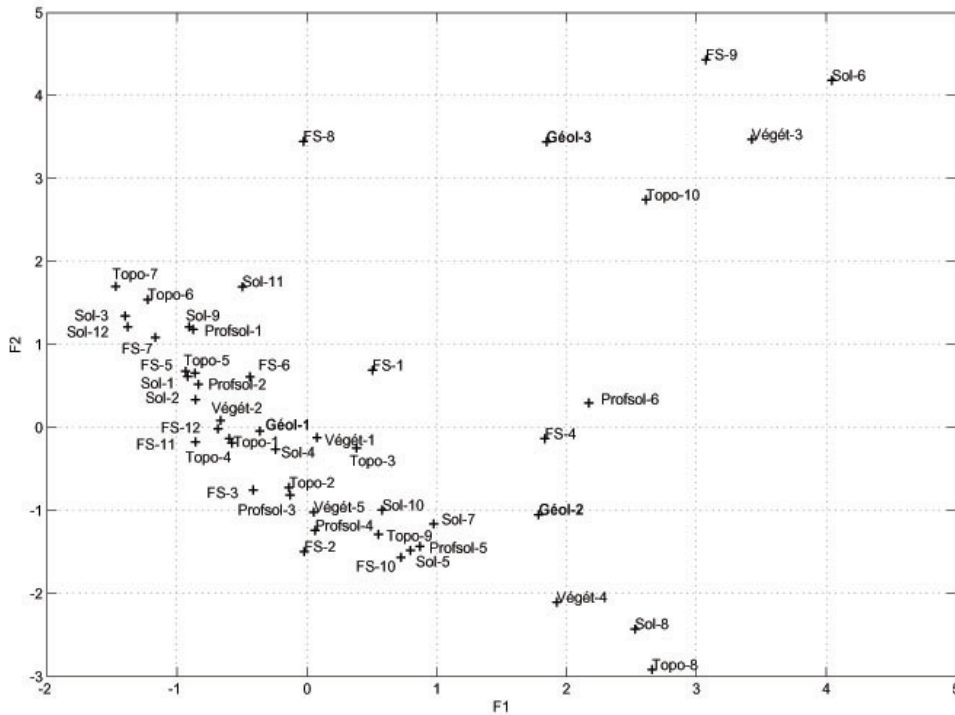


FIG. 4.4 – Visualisation des variables selon les deux premières composantes principales, qui expliquent 52% de la variance.

tions superficielles avec ruissellement diffus sur dalle calcaire' et 'fond de talweg'. Ce "sous-groupe" est également proche de 'Géol-2', qui correspond aux marnes.

Au milieu du groupe autour des calcaires durs se trouve un amas de variables, dont 'pâturages boisés', 'forêt de feuillus', 'RENDOSOL', 'CALCOSOL', 'BRUNISOL', 'haut de la crête', 'pente entre 5 et 45%', 'profondeur de sol 15-25 cm' et 'formations superficielles dominées par les blocs calcaires et la dalle calcaire'.

4.5.5 L'étude d'une zone choisie

La zone en question est un transect de 35 m de large et de 125 m de long. Il est situé sur le versant au sud de la combe et est parallèle à la pente (annexe A.14). L'endroit est choisi pour la richesse des milieux traversés. En effet, le haut du transect se situe dans la Hêtraie à érable, typique de cet étage de végétation. En descendant, la tendance humide devient de plus en plus

marquée, entrecoupée par les "bourelets à myrtilles". Puis, différents types de prairies humides se succèdent jusqu'au bas de la pente, où elle rejoint un talweg ponctué de dolines.

Huit zones de végétation sont définies : *Salicion cinereae*, *Caricion davalliana*, *Calthion*, *Filipendulion*, *Vaccinio-Piceion*, *Adenostylion alliariae*, *Aceri-Fagetum* tendance humide, *Aceri-Fagetum* typique (FIG. 4.5). La Hêtraie à érable, qui appartient à l'alliance *Abieti-Fagenion*, est ici précisée par l'association *Aceri-Fagetum*. Cette zone fait l'objet de deux divisions de par la végétation de la strate herbacée. Ce choix est confirmé par le type de sol et de formations superficielles observés.

Pour les descriptions de ces zones, les relevés phytosociologiques, ainsi que les observations des sondages effectués, se référer à l'annexe A.15.

La topographie est dessinée selon un transect qui suit le côté est de la zone. Les alliances végétales sont également reportées sur le transect. La Hêtraie à érable typique (*Aceri-Fagetum*) se trouve là où la pente est la plus grande. En descendant, la forêt à tendance humide apparaît, ponctuée par les bourrelets de solifluxion à *Vaccinio-Piceion*. En bas de pente la forêt fait place au *Calthion*, puis au *Salicion cinereae* (FIG. 4.6).

Les types de sols et les formations superficielles sont déterminés dans chaque zone de végétation. Sous les alliances *Salicion cinereae*, *Caricion davalliana*, *Calthion* et *Filipendulion*, se trouvent des RÉDUCTISOLS TYP-IQUES et les formations superficielles sont composées de particules fines ruisselées (ruissellement diffus) sur des marnes de l'Argovien en place. Sous le *Vaccinio-Piceion*, c'est un PODZOSOL OCRIQUE soliflué⁹ qui est déterminé. Ce solum se développe dans 60 cm de particules amenées par le ruissellement diffus et la solifluxion, sous lesquelles se retrouvent les marnes argoviennes. Les zones d'*Adenostylion alliariae* et d'*Aceri-Fagetum* tendance humide sont situées sur des RÉDOXISOLS. Les formations superficielles sont également dues au ruissellement diffus sur des marnes en place. Finalement, l'*Aceri-Fagetum* typique se trouve sur des sols appartenant au grand ensemble de référence (GER) des BRUNISOLS. Le solum observé a une profondeur de 25 cm et les formations superficielles sont des blocs calcaires délités de la roche sous-jacente (Séquanien).

⁹se référer à la description du sol 13, annexe B.3

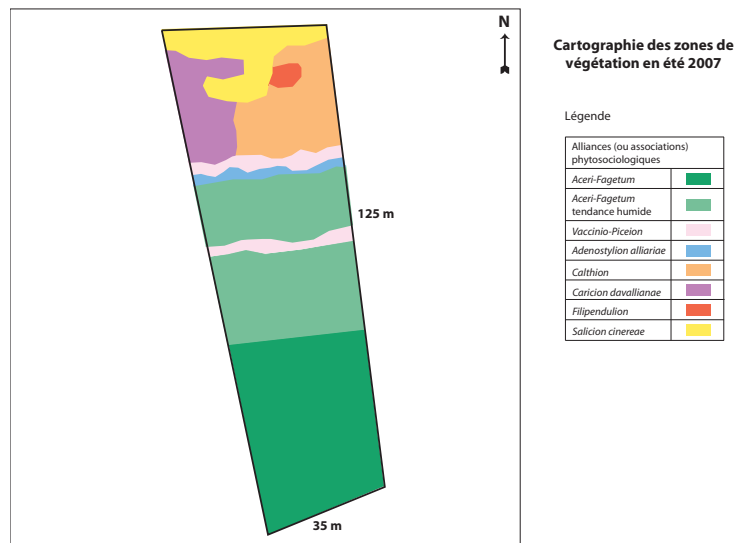


FIG. 4.5 – Carte résultant de l'étude de la végétation dans la zone choisie.

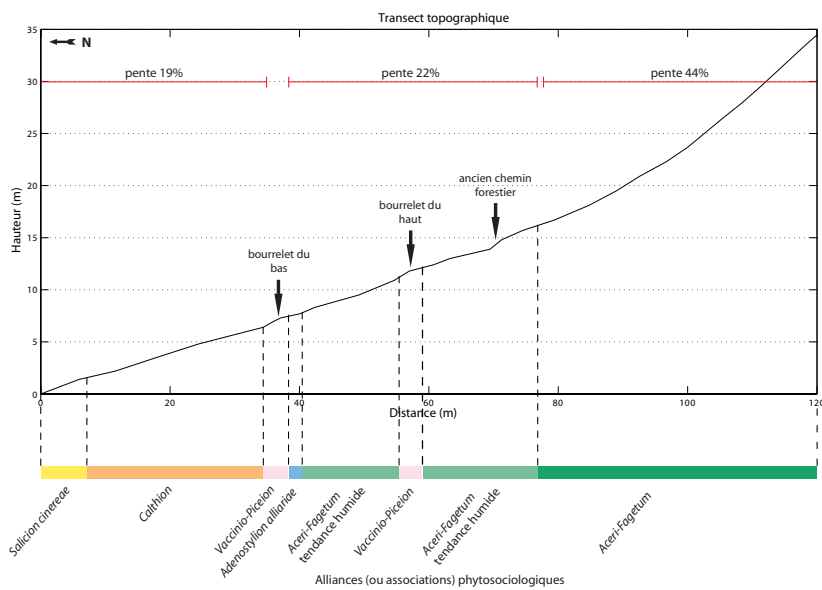


FIG. 4.6 – Topographie et alliances (ou associations) phytosociologiques de la zone d'étude de la végétation selon le côté est. Pour une meilleure visualisation, la distance et la hauteur ne sont pas représentées selon la même échelle. Les pentes sont calculées d'après les mesures de terrain (annexe A.16).

4.6 Discussion & Interprétation

4.6.1 Les cartes

Liens entre la carte des formations végétales et celle des sols

Comme déjà décrit plus haut, les forêts et les sols plutôt minces se trouvent surtout là où les pentes sont les plus grandes. Le type d'exploitation décidé par l'homme définit cette répartition, qui n'est pas faite au hasard. Ces sols en pente n'étant pas très productifs et l'accès étant souvent difficile, les versants sont rarement utilisés pour la pâture du bétail. Cependant, une zone de forêt se situe sur un endroit plus à plat ; le sommet du mont central. De plus, la végétation est de nature différente de celle des pentes car elle est définie comme une forêt de conifères. A cet endroit, le type de sol n'est pas déterminé pour des raisons techniques (impossibilité de sonder à la tarière). Les sols de cette zone sont donc désignés comme "sols à pédogenèse acide avec squelette de silex". L'épaisseur de ces sols est inconnue, mais elle peut être estimée à plus de 75 cm. Ce n'est donc pas la profondeur d'enracinement qui a forcé les hommes à ne pas exploiter la zone comme pâturages. En revanche, c'est la présence d'un important squelette de silex qui rend cet endroit peu productif. Un peu plus bas au sud-est, sur la même bosse, une zone a manifestement été déboisée pour être utilisée comme pâturage. Les sols sont des BRUNISOLS SATURÉS ou MÉSOSATURÉS, donc a priori de bonne productivité. Mais, des cailloux de silex sont toujours observables (carte des formations superficielles) et, avec la pente, ils sont probablement la cause de l'abandon de ce pâturage. A sa place se trouve aujourd'hui une mégaphorbiaie riche en millepertuis et framboisiers, qui représente ici un stade intermédiaire avant la forêt. Les zones de prairies humides correspondent très bien à celles des sols hydromorphes (RÉDOXISOLS, RÉDUCTISOLS TYPIQUES). Sur le versant au sud, deux bandes de forêt de conifères sont observables sur deux bandes de PODZOSOLS, les "bourrelets à myrtilles".

Il semble exister une relation d'exclusivité entre le PODZOSOL et la forêt de conifères. Mais elle est unilatérale, car des PODZOSOLS ne se trouvent pas sous toutes les zones de forêt de conifères. Inversement, des prairies humides ne poussent que sur des sols hydromorphes, mais certains RÉDOXISOLS supportent des pâturages boisés ou de la forêt de feuillus.

La carte des formations végétales est en partie explicable par celle des sols, mais pas uniquement. L'homme joue ici un rôle prépondérant de par l'exploitation des milieux qu'il décide. Il ne faut pas non plus oublier que la rétroaction de la végétation sur le sol est très important, notamment par l'apport de litière ou la stabilisation des pentes.

Liens entre la carte des sols et celle des formations superficielles

La profondeur des sols est directement liée à celle des formations superficielles, qui expriment la distance à la roche substrat. Sur les zones où beaucoup de matériau ruisselé est accumulé se retrouvent des sols en général profonds présentant un caractère hydromorphe (RÉDOXISOL, BRUNISOL-RÉDOXISOL, RÉDUCTISOL). En revanche, lorsque la pente est assez forte pour permettre du colluvionnement, les sols présents sont jeunes, en général peu épais et carbonatés (LITHOSOL, RENDOSOL, CALCOSOL). Les lapiés sont couverts par une mosaïque de sols, car les conditions sont très différentes sur les blocs calcaires, dans les fissures ou dans des cuvettes. Des sols appartenant au GER des BRUNISOLS se retrouvent très fréquemment dans les endroits où la roche calcaire, qui se situe entre 25 et 75 cm de profondeur, est recouverte de particules fines ruisselées pauvres en bases. Le bief à silex, sur le mont, constitue le squelette de sols à pédogenèse acide. Des PODZOSOLS OCRIQUES sont déterminés dans les silex, mais l'impossibilité d'effectuer des sondages dans un tel squelette nous empêche d'étendre ce type de sol à la zone tout entière. En revanche, la présence de PODZOSOLS est confirmée tout le long des "bourrelets à myrtilles", qui sont recouverts de forêt de conifères et de myrtilles, comme leur surnom l'indique.

Le lien entre les formations superficielles et les sols est fort, mais il n'explique pas tout. En effet, le développement d'un sol dépend d'autres facteurs comme la texture des particules fines (argiles, limons) et la disponibilité de l'eau. Dans les pentes fortes, l'eau a tendance à ruisseler le long de la pente plutôt qu'à s'infiltrer verticalement dans le sol. En position de replat, en revanche, le lessivage devient possible par l'infiltration de l'eau. De plus, une texture très fine du sol peut colmater tous les pores et créer une couche imperméable. L'eau y est stoppée dans sa progression et des sols hydromorphes peuvent s'y développer.

Liens entre la carte des formations superficielles et celle de la géologie

Les roches en place fournissent le matériau autochtone ou subautochtone. Dans un paysage calcaire comme le Jura se retrouvent donc des blocs calcaires en place ou colluvionnés. Les silex qui nous intéressent ici étaient auparavant contenus dans la Dalle nacrée (Kühni, 1993). L'altération du calcaire les a libérés, c'est pourquoi ils sont maintenant à la surface. Les formations superficielles sont également constituées de matériau allochtone, dont les loess sont un très bon exemple. Dans ce cas, il n'y a aucun lien avec la géologie de la roche sous-jacente.

Les cartes proprement dites de la géologie et des formations superficielles présentent très peu de liens. Si la roche en place a une influence sur la minéralogie des formations superficielles, ces dernières sont ensuite presque complètement remaniées par les processus du Quaternaire, mis à part les blocs calcaires en place qui sont libérés continuellement par l'attaque de la roche. L'eau, la gravité, le vent, le gel vont remanier ces matériaux et façonner le paysage tel que nous le voyons actuellement. Un autre facteur semble avoir une grande importance : la topographie. En effet, la pente, les talwegs, les replats vont conditionner l'écoulement de l'eau et l'action de la gravité. La formation même du relief relève de la tectonique et de l'érosion à long terme et n'entre pas dans notre domaine d'étude.

4.6.2 Les analyses granulométriques

Les résultats sont commentés en fonction des trois groupes définis par la CAH, comme ils apparaissent dans la FIG. 4.3. Chaque groupe est interprété un à un, en essayant de faire ressortir la cohérence de ce classement, si elle existe. A la fin, certains sols sont décrits dans leur ensemble. Pour une vue d'ensemble des échantillons, de leur signification et de leur provenance, se reporter aux annexes A.4 et A.5.

Groupe 1

Le groupe 1 est constitué des échantillons n°20, 21, 22, 30, 31, 32, 33 et 34.

Ce groupe semble se démarquer par une asymétrie des courbes vers les particules de grandes tailles (FIG. 4.7). En regardant l'indice d'asymétrie en annexe A.9, il apparaît que ce sont les seuls échantillons à présenter une valeur inférieure à -0.1. L'échantillon 22, cependant, a une valeur de 0.13. La comparaison des moyennes et médianes dans ce groupe révèle que les moyennes ont des valeurs de ϕ plus faibles que les médianes, donc plus grossières. De nouveau, ce n'est pas le cas pour l'échantillon 22. Sa position dans le groupe 1 ne semble pas vraiment justifiée. D'après ses valeurs, il serait plus judicieux de le placer dans le groupe 2, qui est d'ailleurs très proche sur la FIG. 4.3.

Il apparaît donc une tendance vers les particules plus grossières dans ce groupe. Effectivement, un mode à 1ϕ (sables moyens à grossiers) est observable sur toutes les courbes granulométriques. Les échantillons 20 à 22 proviennent du sol 7, un PODZOSOL OCRIQUE situé dans la zone à silex. Les échantillons 30 à 34 sont prélevés dans le sol 6, un sol complexe polyphasé, également dans les silex¹⁰. Sachant cela, il est alors possible que les particules

¹⁰De plus amples descriptions sont données au chapitre 5.

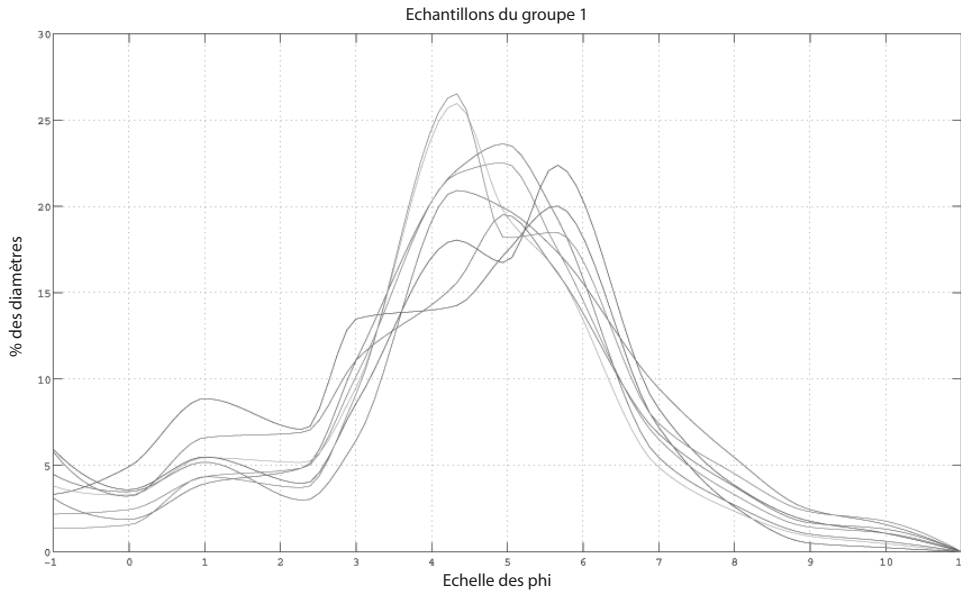


FIG. 4.7 – Représentation des échantillons du groupe 1.

de diamètre de 1ϕ soient des sables issus de l'altération mécanique des silex.

Un autre détail à considérer est la faible proportion de particules argileuses ($> 8\phi$) par rapport au groupe 2. La tendance grossière observée dans ce groupe pourrait aussi être due à un décalage des courbes entières vers les particules plus grandes. Une cause possible est l'apport de matériau allochtone plus grossier, par exemple des limons éoliens, qui s'oppose ainsi aux argiles autochtones issus de l'altération des calcaires en place. Cependant, la présence de loess ne peut être confirmée uniquement par ces courbes, mais par les analyses minéralogiques aux rayons X discutées plus loin. Mais, il ne faut pas oublier que les particules fines pourraient également provenir de l'altération des loess.

Groupe 2

Le groupe 2 est constitué de tous les autres échantillons sauf le n°1.

Ce groupe, présenté à la FIG. 4.8, n'apparaît pas comme très homogène. Il semble rassembler, peut-être par défaut, tous les échantillons qui ne se démarquent pas dans le groupe 1.

Comme déjà discuté plus haut, il existe une tendance plus fine dans

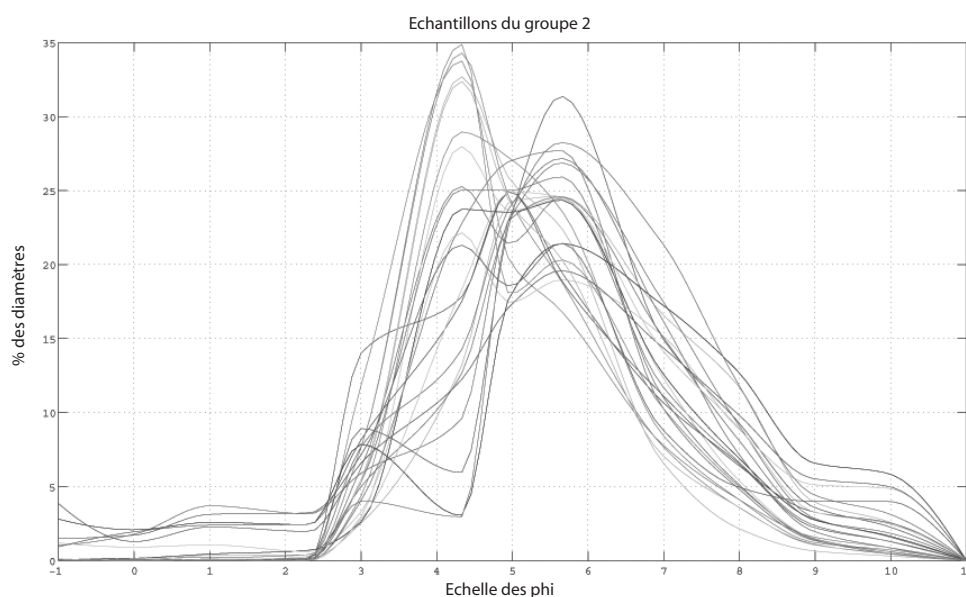


FIG. 4.8 – Représentation des échantillons du groupe 2.

ces échantillons. Le skewness montre une symétrie granulométrique ou une asymétrie vers les petites tailles (annexe A.9) et les moyennes sont plus fines que les médianes. Dans une partie des échantillons, une certaine quantité d'argiles est observable vers $9-10\phi$. Probablement issues de l'altération des roches sous-jacentes, ces particules expriment une origine autochtone dominante des échantillons. Mais, de nouveau, il n'est pas possible d'affirmer que tout le groupe 2 est autochtone, car certaines courbes présentent un mode limoneux important autour de 4ϕ , ce qui n'exclut pas l'hypothèse de limons éoliens.

Groupe 3

Le groupe 3 est constitué du seul échantillon 1.

Cet échantillon reste tout à fait particulier. Son indice de skewness est de -0.1 et sa moyenne est plus grossière que la médiane. Tout ceci indique une tendance vers les grandes particules. Mais, en regardant la FIG. 4.9, il apparaît au contraire que c'est l'échantillon analysé comprenant le plus de particules fines. Comme il ne présente pas de particules de diamètre plus

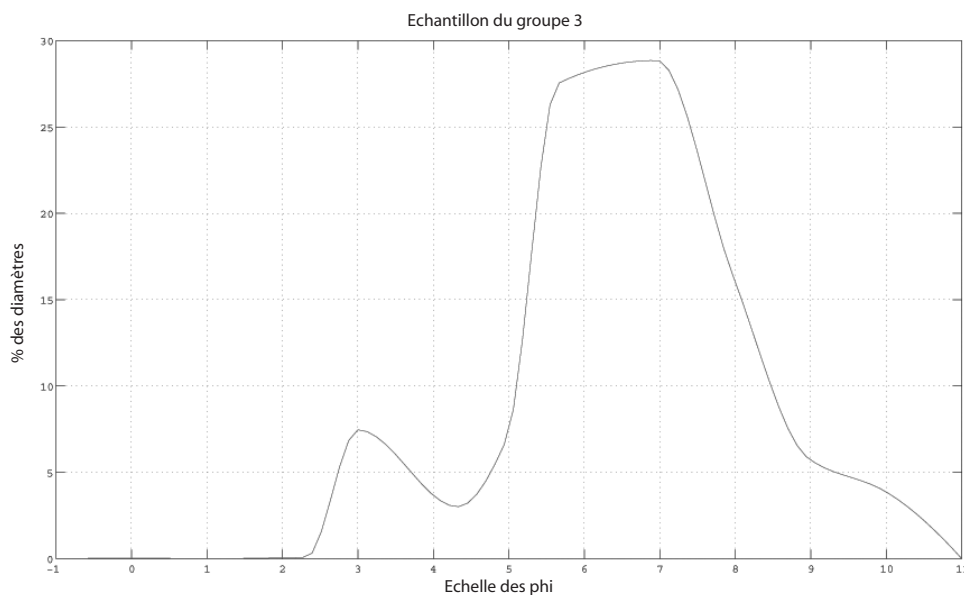


FIG. 4.9 – Représentation de l'échantillon du groupe 3.

grand que 0.25 mm environ (autour de 2ϕ), la médiane est décalée vers les particules très fines. En effet, elle est de 7.2ϕ , ce qui correspond à des limons très fins. Du coup la moyenne, qui est elle-même de 7.1ϕ , est considérée comme plus grossière. L'indice de skewness est également calculé par rapport à la médiane, d'où la même tendance exprimée.

L'allure de cette courbe granulométrique est spéciale. Le mode dominant est dans les limons fins, mais il existe également un mode de sables fins (3ϕ) et un autre argileux (10ϕ). La tendance, plutôt autochtone, est confirmée plus bas par les analyses minéralogiques. Cet échantillon provient d'un sondage effectué sur la crête nord de la combe et la roche sous-jacente est composée de marnes non répertoriées, probablement du Séquanien.

Sol 6

Ce profil pédologique est un des plus complexes que nous ayons creusés. D'une profondeur totale de 166 cm , les 95 premiers centimètres sont constitués d'un important squelette de silex¹¹. Il semble être la superposition de

¹¹pour la description complète se référer au chapitre 6

deux sols différents, le plus ancien étant situé sous les silex au contact de la Dalle nacrée. Six horizons sont analysés pour la granulométrie et notés de 6-1 à 6-6. Ils correspondent aux numéros 30 à 35 utilisés lors des analyses.

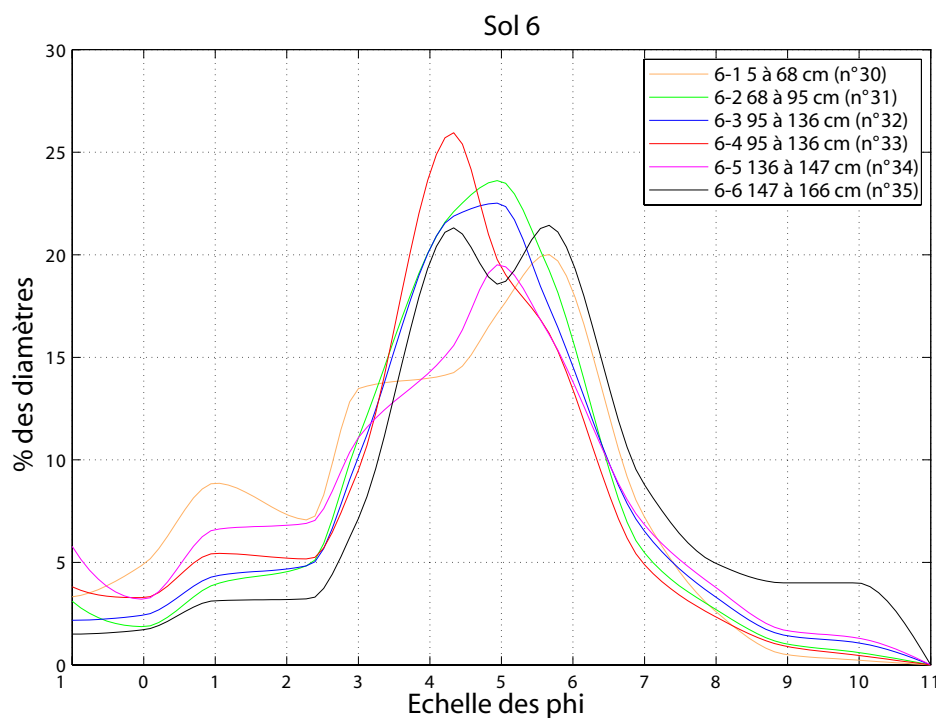


FIG. 4.10 – Représentation des échantillons du sol 6.

Les échantillons 30 à 34 font tous partie du groupe 1 décrit précédemment selon la FIG. 4.3, alors que le n°35 appartient au groupe 2. Tous présentent un mode de sables moyens à grossiers (1ϕ), qui pourrait être issu des silex. Ce mode est cependant moins marqué dans l'horizon le plus profond (6-6, n°35) et, au contraire, mieux exprimé dans l'horizon 6-1 (n°30), qui contient l'important squelette de silex (FIG. 4.10).

Les échantillons 6-1 (n°30) et 6-5 (n°34) montrent des courbes particulières. Ils sont les deux plurimodaux et présentent un mode dans les limons (entre 5 et 6ϕ), un autre dans les sables fins (3ϕ) et un dernier aux alentours de 1ϕ . D'une façon générale, ces échantillons sont très mal triés (indice de sorting supérieur à 2) et doivent être le résultat de remaniements complexes et d'altération mécanique des substrats. Ils sont probablement les indicateurs de périodes de rhexistase, par exemple lors d'épisodes glaciaires.

Les échantillons provenant des horizons intermédiaires 6-2 (n°31) à 6-4 (n°33) n'ont pas ces mêmes caractéristiques. Les courbes n°31 et 32 sont pratiquement similaires. Les limons grossiers (entre 4 et 5 ϕ) sont très fortement représentés mais ne sont pas bien triés, car il n'y a pas un mode précis qui domine. Ce mélange est probablement dû à une pédoturbation. L'échantillon n°33 présente les mêmes types de particules limoneuses, mais qui semblent réparties en deux modes distincts. Cet horizon pourrait être le matériau parental des deux autres. Cependant, aucune affirmation n'est possible et il faut des analyses de micromorphologie sur lame mince pour confirmer ces hypothèses¹². Mais, si c'est la cas, il est alors permis de parler de paléopédogenèse sans lessivage (type BRUNISOL), car ces trois échantillons se situent entre 70 et 140 cm de profondeur et ne reflètent pas la pédogenèse actuelle podzolisante. Répartis dans le groupe 1 par la CAH, ils peuvent présenter une composante allochtone, qui est discutée plus loin.

L'horizon basal du profil, 6-6 (n°35), est situé directement au contact de la roche-substrat, la Dalle nacrée. La courbe granulométrique de cet échantillon diffère considérablement des autres et est d'ailleurs classée dans un autre groupe lors de la CAH. La quantité de limons grossiers est importante et deux populations semblent se distinguer. Un mode argileux est également observable aux alentours de 9 et 10 ϕ et est vraisemblablement issu de l'altération de la roche calcaire. La tendance de cet échantillon est donc plutôt autochtone.

Sol 13

Le profil de sol n°13 est creusé dans un des bourrelets de solifluxion ("bourrelets à myrtilles") se trouvant sur le versant au sud de la combe. Cinq échantillons provenant des horizons 13-2 à 13-6 (n°14 et 26 à 29) sont analysés. Le dernier représente vraisemblablement les marnes argoviennes sous-jacentes.

Tous les échantillons appartiennent au même groupe de la CAH, à savoir le groupe 2. Mais, sur la FIG. 4.3, ils semblent éloignés les uns des autres au sein de l'ensemble. En effet, la FIG. 4.11 montre des courbes granulométriques fort différentes. Elles ont néanmoins toutes la particularité de ne présenter aucune particule plus grande que 0.25 mm (2 ϕ). C'est sans doute une des raisons pour lesquelles ces échantillons appartiennent au groupe 2, qui exprime une tendance vers les particules fines.

Si l'horizon 13-6 (n°14) est considéré comme le matériau parental, il apparaît que les horizons 13-5 (n°29) et 13-4 (n°28) sont relativement proches.

¹²chapitre 5.

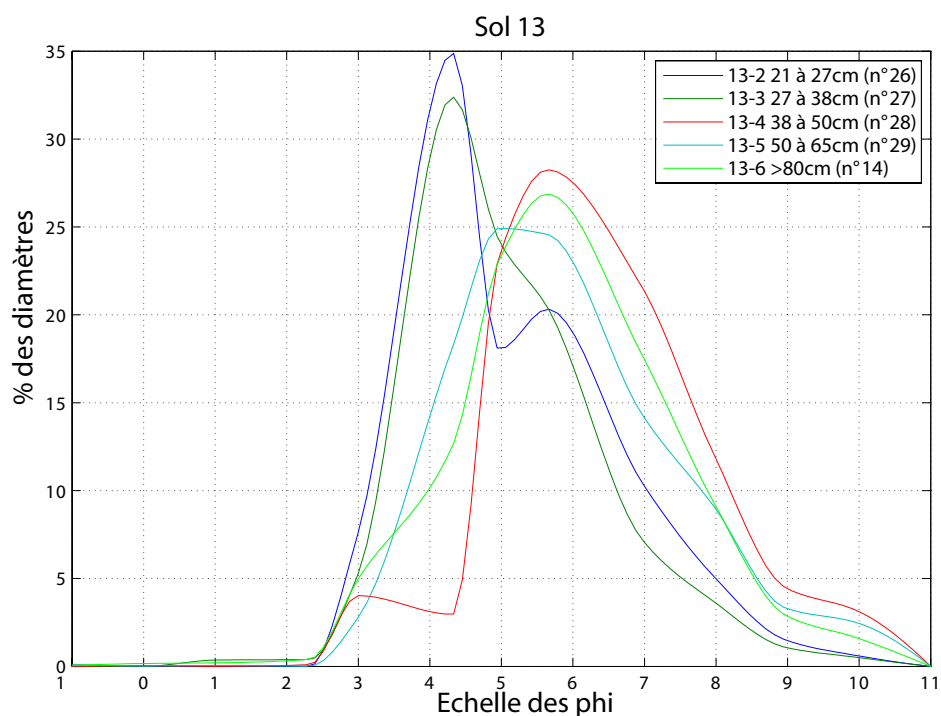


FIG. 4.11 – Représentation des échantillons du sol 13.

Les limons fins (entre 5 et 6ϕ) constituent la fraction prépondérante et les argiles (entre 9 et 10ϕ) sont également mieux représentées que dans les autres horizons. Dès lors, il semble évident de considérer les horizons 13-5 et 13-4 comme autochtones. Ils se sont développés dans les résidus d'altération des marnes de l'Argovien, qui peuvent représenter jusqu'à 38% de la roche intacte (Bouyer, Miserez & Pochon, 1978).

Les échantillons provenant des horizons situés plus en surface, 13-2 (n°26) et 13-3 (n°27), ont des allures totalement différentes. Leur mode principal est à 4.3ϕ , dans les limons grossiers. Un deuxième mode est identifiable dans les limons fins, qui ressemble à celui des marnes. Néanmoins, celui-ci est nettement moins exprimé, d'où le fait que la courbe de l'horizon 13-3 soit considérée comme étant très leptokurtique (indice de kurtose de 1.54). Ces deux échantillons ne présentent en outre pratiquement pas d'argiles. Même s'ils ne sont pas classés dans le groupe 1 de la CAH, il n'est pas exclu qu'ils contiennent une certaine composante allochtone, parfois mélangée aux résidus autochtones.

S'il est difficile d'établir un lien granulométrique entre ces échantillons d'un même sol, il ne faut pas oublier qu'ils proviennent d'un bourrelet de solifluxion. Les horizons présents ont par conséquent dû subir des remaniements ou des retournements, mélangeant ainsi les substrats et par la même occasion les traces de leur origine. Une description et analyse plus profonde est faite dans le chapitre 6 traitant des processus de pédogenèse.

4.6.3 Les analyses minéralogiques

L'échantillon 1 est issu d'un sondage sur la crête nord de la combe. Il appartient au GER des BRUNISOLS. Son substrat géologique est constitué des couches du Séquanien. Avec sa forte teneur en kaolinite et en micas, son faible rapport Pla/FK et ses 8% de chlorite, cet échantillon est à dominante autochtone. Il n'y a pas de trace de loess, bien que sa position sommitale ait pu nous le suggérer.

Les échantillons 12 et 13 proviennent du même sol, situé dans le "bourrelet à myrtilles" sur le versant au sud de la combe. Avec beaucoup de kaolinite mesurée, peu de chlorite et un rapport Pla/FK faible, ces échantillons sont typiquement autochtones. La présence de feldspaths potassiques en assez grande quantité est probablement liée à la roche substrat, les marnes de l'Argovien. Une grande quantité de fer est observée (goethite), peut-être aussi liée à la roche-mère. Ce sol est déterminé comme appartenant au GER des PODZOSOLS. La grande quantité de quartz mesurée dans l'échantillon 12 fait penser qu'il s'est développé dans le résidu d'insolubilité des marnes argoviennes, accumulé en bas de pente sous forme de bourrelet de solifluxion.

L'échantillon 13 est prélevé dans des marnes de l'Argovien, entre 80 et 100 cm de profondeur.

L'échantillon 12 provient de 30-40 cm de profondeur et a déjà subi une pédogenèse plus importante. En effet, sur le spectre des résultats des rayons X (annexe A.11), les micas attaqués ne montrent plus qu'un pic de faible intensité accompagné de nombreux pics mal différenciables, qui correspondent aux hydroxy-Al-Fe. La présence de lépidocrocite observée est liée au caractère rédoxique du sol. En effet, d'après Pochon (1978), elle se trouve spécialement dans les sols à drainage réduit sur marno-calcaires argoviens présentant un engorgement temporaire. Des conditions réductrices sont nécessaires pour produire une source de Fe^{2+} . Puis, une oxydation ménagée par perméabilité restreinte permet la néoformation de lépidocrocite, qui est un polymorphe instable de la goethite (Bouyer *et al.*, 1978).

Les échantillons 20 et 21 (7-4 et 7-5) sont prélevés dans deux horizons

du même sol, un PODZOSOL OCRIQUE sur silex¹³. Mais, il semble que ce ne soit pas le matériau parental. En effet, les grandes quantités de plagioclase et de chlorite ainsi que le rapport Pla/FK élevé indiquent la présence de matériau allochtone : des loess d'origine alpine. La fraction 2-16 μm (limons) est typiquement allochtone. En revanche, la fraction $< 2 \mu\text{m}$ (argiles) montre une influence des calcaires autochtones de par le moindre taux de chlorite et la proportion un peu plus élevée de kaolinite. Il est probable qu'un mélange ait eu lieu avec des résidus de la roche-substrat. L'histoire de cette zone à silex est très complexe et c'est ce que nous essayons de reconstituer. La présence importante d'hydroxy-Al-Fe indique que ces échantillons ont déjà subi une pédogenèse avancée, ce qui n'a rien d'étonnant étant donné qu'il s'agit d'un PODZOSOL OCRIQUE.

L'échantillon 23 est un fragment de la Dalle nacrée (Callovien). Cette roche est le substrat des sols 6 (échantillons 30 à 35) et 7 (échantillons 12 et 13), sous les silex. La composition est essentiellement constituée de micas. Un peu de plagioclase et de chlorite sont détectés dans la fraction 2-16 μm . C'est aussi le seul échantillon à ne pas contenir de kaolinite, qui est pourtant considérée comme autochtone. Beaucoup de fer est présent, illustré par les fortes teneurs en goethite. Dans la fraction $< 2 \mu\text{m}$, les 28% d'hydroxy-Al-Fe pourraient en réalité être des interstratifiés mal cristallisés de type illites-smectites. En effet, pour différencier ces argiles altérées riches en fer, de plus amples analyses seraient nécessaires. Le fait qu'il n'y ait aucune mesure d'hydroxy-Al-Fe dans la fraction 2-16 μm appuie également cette théorie.

Les échantillons 30 à 35 proviennent du même profil, mais pas du même sol¹⁴. Cette fosse pédologique est creusée dans une épaisseur de 90 cm de clastites de silex, sous lesquels se trouvent encore 60 cm de matériau fin reposant sur la Dalle nacrée. La FIG. 4.12 montre les résultats des analyses aux rayons X pour les échantillons 30 à 35. Le n°23 est ajouté, car il représente la roche substrat.

L'échantillon 30 (horizon AE, 6-1) est prélevé à la surface, dans les clastites de silex où la pédogenèse actuelle est podzolisante. De grandes quantités de kaolinite et de micas expriment le caractère autochtone de l'échantillon. Cependant, la présence de 28% de chlorite dans la fraction 2-16 μm et le rapport Pla/FK de 1 indiquent une légère tendance allochtone. Mais, même si le côté autochtone l'emporte, la roche-mère se trouve à plus de 160 cm de profondeur et des silex sont venus s'entasser entre deux.

L'échantillon 31 (horizon BPh, 6-2) a également un caractère autochtone, identifiable par la quantité de kaolinite (35%) de la fraction $< 2 \mu\text{m}$. Cepen-

¹³Pour une description complète du sol 7, se référer à l'annexe B.7.

¹⁴Pour une description complète du sol 6, se référer à l'annexe B.6.

nant, une composante éolienne mineure est également présente. En effet, la forte teneur en chlorite (50%) et le rapport Pla/FK de 1.3 ne peuvent être dues qu'à la présence de loess. Comme dans l'échantillon 30, l'absence de goethite est étonnante. Peut-être ce phénomène est-il causé par la pédogenèse podzolisante, qui entraîne un appauvrissement en fer des horizons supérieurs au profit des horizons d'accumulation sous-jacents.

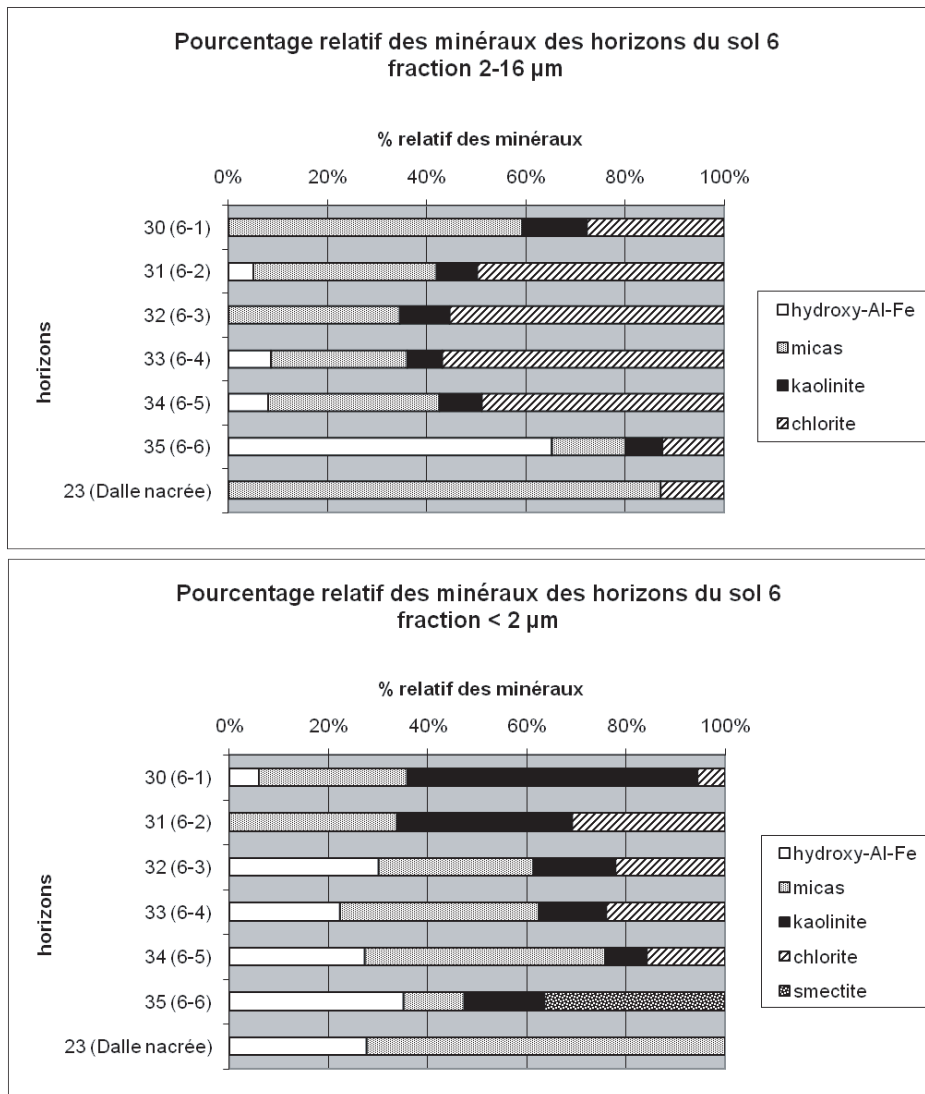


FIG. 4.12 – Représentation de la minéralogie des horizons du sol 6.

Les échantillons 32 à 34 (BPsIIS et IIS, 6-3 à 6-5) présentent une com-

posante éolienne dominante. La présence d'amphibole, ainsi que la grande quantité de chlorite et le rapport Pla/FK élevé sont caractéristiques des dépôts loessiques. Dans ce type d'échantillon, la fraction $<2 \mu\text{m}$ est peu abondante et l'intensité des pics relevés est faible (spectre de l'échantillon 33 en annexe A.11). Dans l'échantillon 34, de la goethite est observée, tout comme dans l'échantillon 23 (Dalle nacrée) et 35 (horizon II(I) β). Il est possible que l'influence de la roche calcaire sous-jacente se fasse déjà sentir dans cet horizon.

L'échantillon 35 (horizon II(I) β , 6-6) est prélevé tout au fond du profil, au contact avec la Dalle nacrée. Le faible taux de chlorite et l'indice Pla/FK de 0.39 indiquent qu'il n'y a pas de matériau éolien dans cet échantillon. Cet horizon est donc complètement autochtone. La présence importante de goethite suggère un lien entre cet échantillon et le n°23, la Dalle nacrée. Il est donc surprenant de trouver des teneurs en micas et kaolinite si basses. La grande quantité d'hydroxy-Al-Fe est remarquable, ainsi que la présence de smectite. Ces constatations mènent à la conclusion d'une forte dégradation des argiles (micas, kaolinite) par la pédogenèse, entraînant ainsi la formation des interstades (hydroxy-Al-Fe) et même du stade final de transformation, qui est la smectite. La pédogenèse de cet échantillon semble donc beaucoup plus évoluée que celle des autres horizons. L'hypothèse qu'il s'agit là de deux sols superposés en est étayée. La mise en place de ces sols est également un témoin important des dynamiques passées et sera discutée au chapitre 7.

4.6.4 Les analyses statistiques des observations de terrain

La séparation des variables en trois groupes semble très cohérente. En effet, il n'est pas étonnant de voir que les caractéristiques de la forêt sur silex que nous étudions sont vraiment à part des autres. Il en est de même avec le groupe autour des marnes, où les conditions sont également particulières, bien que très différentes du groupe précédent. Il semble exister une relation forte entre les variables au sein de ces ensembles. Peut-on parler de déterminisme de certains facteurs, comme la géologie et la topographie? Dans ces deux types de milieu, nous n'avons observé que peu d'interventions humaines. Il est alors possible de penser que ces conditions particulières entraînent la formation de niches où s'établit un climax stationnel.

Le groupe situé autour des calcaires durs est légèrement étalé selon un axe lié à la topographie. En effet, une des extrémités contient les variables 'pente 50-60%' et 'pente >65%', alors que l'autre présente les caractéristiques de situation de fond de talweg. A la première sont associés des types

de sols minces (LITHOSOL, RANKOSOL, RENDISOL, 'profondeur sol <10 cm') et des formations superficielles avec des blocs calcaires colluvionnés ('FS-7'). Toutes ces variables sont conditionnées par la forte pente et l'action de l'homme est faible dans ces endroits inaccessibles. A l'autre extrémité de ce groupe se trouvent des sols épais sous l'influence de l'eau en grande quantité (NÉOLUVISOL, RÉDOXISOL, 'profondeur 60-70 cm'). Ces conditions sont possibles par la position topographique au fond d'un talweg, qui influe sur la nature des formations superficielles ('FS ruissellement diffus sur dalle calcaire'). La variable des marnes n'est pas loin. En effet, elles pourraient aussi être liées à ce genre de milieu, ou du moins provoquer les mêmes conditions hydriques. Ces types de sols et de végétation, parfois inclus dans des pâturages boisés, peuvent être exploités par l'homme. Cependant, ils ne sont pas privilégiés.

L'amas de variables au milieu du grand groupe n'apparaît pas comme spécifiquement lié à un facteur donné. La pente est faible à moyenne et la végétation est de type forêt de feuillus (Hêtraie à érable) ou pâturages boisés. Les types de sol sont principalement les CALCOSOLS et BRUNISOLS SATURÉS ou MÉSATURÉS de profondeur moyenne (entre 15 et 55 cm). Les conditions réunies dans ces milieux sont effectivement les plus favorables à l'exploitation humaine, d'où la présence de pâturages boisés.

On peut dire que la répartition des variables sur ce graphique reflète bien la réalité observée sur le terrain. Certains facteurs ont une importance prépondérante, voire déterminante, sur d'autres, ce qui semble être le cas de la géologie et de la topographie. Des propriétés particulières émergent et déterminent alors les milieux qui, naturellement, ont tendance à évoluer vers leur climax. Bien entendu, beaucoup de critères autres que la géologie et la topographie interviennent ensuite dans la redistribution des formations superficielles, la pédogenèse, l'établissement de la faune et de la flore, etc. Cependant, un troisième grand facteur est à prendre en compte : l'exploitation humaine. Toutes les zones ne sont pas définies comme potentiellement productives par l'homme, aussi trouve-t-on encore des milieux que l'on peut définir comme climaciques. Mais, si un endroit présente un intérêt, il est le plus souvent exploité. Dans la zone étudiée lors de ce travail, les principaux types sont la pâture du bétail et la sylviculture. Dans l'hypothèse où l'on considère les activités humaines comme un facteur au même titre que la géologie ou la topographie, peut-on dès lors parler de "climax anthropique" pour les zones exploitées ?

4.6.5 L'étude d'une zone choisie

Tout comme pour les analyses statistiques des observations de terrain, la topographie et la géologie semblent jouer un rôle prépondérant dans la répartition de la végétation dans la zone étudiée. La géologie peut influencer directement la pédogenèse de par les produits de son altération ou sa structure propre, mais elle influe également sur le relief par l'érosion différentielle qu'elle entraîne. La zone étudiée est un versant. Le relief y est représenté par la pente. Là où la géologie est faite de marnes argoviennes, dans tout le bas du versant, la pente est de 19% et 22% dans les deux secteurs montrés à la FIG. 4.6. En revanche, la pente passe à 44% dans le haut du versant, quand la géologie est constituée de calcaires durs du Séquanien. La topographie détermine ensuite la distribution de l'eau et des particules fines, ce qui influe sur les formations superficielles. Elles-mêmes agissent sur la pédogenèse, qui conditionne à son tour l'établissement de la végétation. Il est également intéressant de constater que les mêmes dynamiques sont observables à l'échelle d'un versant ou à celle de la combe entière.

En étudiant la zone choisie de bas en haut, les observations suivantes sont faites.

Tout en bas du versant, la pente n'est pas très forte (19%). Elle permet l'accumulation des particules fines ruisselées depuis le haut. La plupart sont des résidus d'altération des marnes argoviennes, mais il n'est pas exclu d'y trouver également des restes de loess. Ces formations superficielles créent des conditions relativement imperméables et la grande quantité d'eau qui ruissèle sur le versant y reste piégée un moment, avant de continuer dans les dolines plus bas. C'est pourquoi des RÉDUCTISOLS TYPIQUES sont observés dans toute la zone des prairies humides et saulaies. Les conditions d'hydromorphie extrême ne permettent l'établissement que de la végétation adaptée. En effet, la forêt ne s'y aventure pas et, en dehors des saules, aucun arbre ou arbuste n'arrive à y pousser. En revanche, la répartition des différentes alliances (*Salicion cinereae*, *Caricion davalliana*, *Calthion*, *Filipendulion*) reste inexplicée. Il doit exister des facteurs déterminants, car la mosaïque des milieux est bien définie et les limites sont nettes (pas de zones de transition). Pourtant, le type de sol observé sous chaque zone est le même et seule la profondeur change, faisant varier les formations superficielles en conséquent. Peut-être des analyses pédologiques permettraient une explication. A moins que ce mystère ne soit dû à l'écoulement de l'eau sur le versant entier.

Juste au-dessus se trouve le premier "bourrelet à myrtilles" formé par la solifluxion de tout le versant. Un deuxième est observé un peu plus haut dans la pente. Les formations superficielles sont également des particules fines ruisselées sur des marnes en place, mais le sol qui s'y développe cette fois est

un PODZOSOL OCRIQUE soliflué. C'est pour le moins inhabituel qu'un tel type de sol se trouve dans 60 cm de résidus d'altération des marnes, dans un versant où ruissèlent des eaux probablement chargées en carbonates dissous. Peut-être le bourrelet est-il isolé de l'eau de ruissellement qui coule sur les marnes imperméables ? Dans ce cas, le seul approvisionnement en eau serait les précipitations météorologiques, permettant ainsi un développement acide du sol et de la végétation. Cette hypothèse est inspirée du travail de Vadi (1997) et de Gobat (1984) et de nombreuses analyses devraient être faites pour la confirmer.

L'*Adenostylion alliariae* se trouve juste au-dessus et parfois entre des langues du bourrelet¹⁵. L'influence de l'eau est de nouveau plus forte, car le type de sol déterminé est un RÉDOXISOL de 50 cm de profondeur. Dans l'hypothèse que le bourrelet est, d'une manière ou d'une autre, isolé des eaux de ruissellement, l'*Adenostylion alliariae* ne se trouverait pas dans les mêmes conditions et subirait les effets de la grande quantité d'eau probablement calcaire qui descend le long du versant.

La Hêtraie à érable à tendance humide se trouve dans un endroit où la pente est moyenne (22%). Toujours sur des marnes et un substrat fait de particules fines ruisselées, le type de sol est un RÉDOXISOL de 40 cm de profondeur. Cette zone appartient bien à l'association *Aceri-Fagetum*, mais elle est séparée de la Hêtraie à érable typique par plusieurs critères : la présence de végétation herbacée hydrophile (*Caltha palustris*, *Equisetum sylvaticum*, *Gueum rivale*, *Polygonum bistorta*), l'absence d'une grande quantité d'espèces typiques de la Hêtraie à érable (annexe A.15), le type de sol, de formations superficielles, la géologie et la pente. De nouveau, certains de ces facteurs sont liés, car la pente faible permet l'accumulation des particules fines ruisselées et de résidus d'altération des marnes qui créent un substrat relativement imperméable, ce qui permet alors le développement de conditions hydromorphes.

La Hêtraie à érable typique est localisée sur le haut du versant. La pente moyenne est de 44% et atteint même 54% dans la partie supérieure. La disparition de la tendance humide est due à plusieurs causes. L'eau de ruissellement s'écoule mais ne peut pas stagner dans une pente aussi forte, les formations superficielles sont des blocs calcaires sur la roche en place (les particules fines ruisselées sont présentes sur moins de 25 cm et ne sont donc pas prises en compte), la géologie est constituée de calcaires durs et non plus de marnes imperméables. Le sol observé est de type A/S/IICca et fait 25 cm de profondeur. L'horizon S n'est pas carbonaté. Ce solum peut être rattaché aux CALCISOLS (dans ce cas la séquence serait Aci/Sci/Cca) ou au GER des

¹⁵La représentation cartographique a été simplifiée dans la FIG. 4.5.

BRUNISOLS. Etant donné que les roches du Séquanien libèrent très peu de particules (résidu d'insolubilité de 3.5% selon Bouyer *et al.*, 1978) et qu'il y a sûrement eu des loess déposés sur ce versant comme sur le reste du paysage, l'idée du GER des BRUNISOLS est préférée. De plus, c'est ce qui a été observé dans la majorité des sondages effectués sur ce versant dans les mêmes conditions (annexe A.2).

4.6.6 Discussion générale

De toutes les observations faites sur le terrain, en réalisant les cartes ou en traitant les résultats obtenus, des facteurs ressortent, ainsi que des liens d'influence entre eux. Comme rassemblement de ces idées, un modèle est proposé (FIG. 4.13). Il est évidemment incomplet, car ce n'est pas possible de représenter toutes les composantes sur un seul graphique lisible. Un choix est donc fait, en fonction des résultats les plus pertinents.

Ce modèle s'inscrit dans un cadre qui a été défini pour l'étude et correspond à l'échelle du paysage. Au-delà de ces limites arbitraires, bien d'autres facteurs et d'autres flèches pourraient être rajoutés. A une échelle plus large de temps et d'espace, il y aurait le climat et probablement la tectonique. Les deux influencent la géologie du milieu (en faisant apparaître les différentes strates en fonction de l'érosion) et la topographie, elle aussi résultante de processus plus importants. A l'inverse, en considérant une échelle plus étroite, une place devrait être accordée aux synusies végétales, à la faune du sol, à la microfaune bactérienne et fongique, aux réactions enzymatiques de l'humification, au comportement des éléments et ions présents dans la solution du sol et bien d'autres encore. Certains de ces éléments sont justement étudiés dans les chapitres suivants. D'autres pourraient faire l'objet de recherches à venir.

Sur ce modèle se retrouvent les quatre couches du paysage étudiées durant ce chapitre : la géologie, les formations superficielles, les sols et la végétation. Chaque couche est en partie expliquée par celle qui la précède, mais d'autres facteurs interviennent à chaque niveau. Un certain déterminisme apparaît alors. Si, en connaissant les facteurs en amont, il est possible de se faire une idée d'une des couches, aucune certitude n'est possible. En effet, les relations entre ces facteurs sont très complexes et ils ne sont de loin pas tous identifiés ou représentés ici. De plus, il existe pratiquement toujours des flèches allant en sens inverse, même si elles ne sont pas toutes sur ce graphique. Celles qui sont dessinées sont plus fines, car leur influence a été déterminée comme moindre dans le cadre du raisonnement effectué lors de ce travail. Ce modèle n'est donc pas applicable tel quel, mais il peut donner des pistes de réflexion pour la compréhension du paysage.

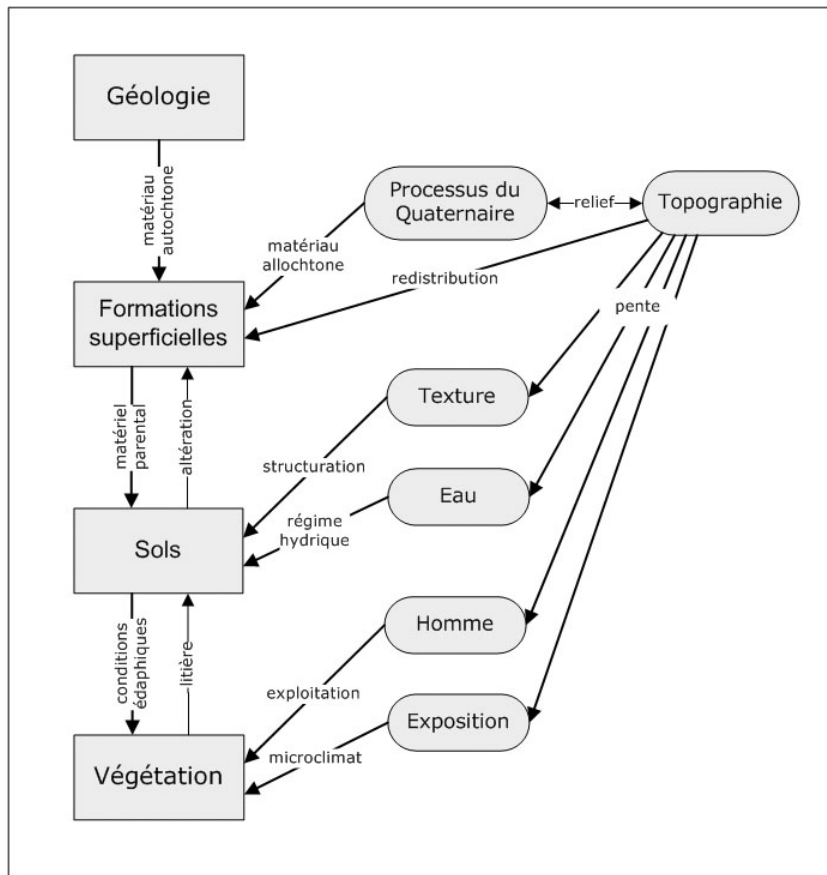


FIG. 4.13 – Proposition de modèle simplifié des différentes couches du paysage étudiées (rectangles) et des facteurs et processus déterminants.

Comme déjà discuté plus tôt, la géologie et la topographie sont des facteurs prépondérants dans cette étude. Situés en amont des autres facteurs, ce sont d'eux que les flèches partent. Les processus du Quaternaire sont également au même niveau. Ils n'ont pas été étudiés dans les analyses statistiques car il est impossible de les mesurer actuellement. Ces dynamiques qui se sont déroulées au cours du Quaternaire font justement l'objet d'une partie de cette étude. Dans ce cas, la réflexion est inverse. En effet, le but est de retrouver la trace de ces processus par l'observation de leurs "causes" : les formations superficielles.

A l'autre bout de la chaîne se trouve la végétation. Elle apparaît ici comme une "conséquence" de tous les autres facteurs, mais joue tout de même un rôle de rétroaction illustré par la litière. La végétation est sans doute la

couche la plus facile à observer dans le paysage et peut être parfois révélatrice de conditions édaphiques ou géologiques particulières, comme dans le cas de la forêt sur silex. Mais ce déterminisme ne peut de nouveau pas être généralisé. Certains liens sont peut-être exclusifs dans un sens mais pas dans l'autre (par exemple une podzolisation a toujours lieu sous de la végétation acidifiante, mais des myrtilles ou des épicéas ne poussent pas uniquement sur des PODZOSOLS).

4.7 Conclusion

Les loess

Au fil de ce travail, la présence de matériau allochtone dans la zone étudiée est devenue une évidence. Les loess, que Pochon (1973, 1978) fut le premier à décrire, ont déjà été étudiés par plusieurs auteurs (Adate, 2000; Bouyer *et al.*, 1978; Havlicek, 1999; Havlicek & Gobat, 1996). Ces limons sont issus de la métamorphie alpine. Erodés par les glaciers du Würm, ils subissent une déflation quand ceux-ci se retirent. Le vent les dépose entre autre sur la chaîne jurassienne, et ce déjà avant la fin de la glaciation würmienne, jusqu'à la disparition totale des glaciers et la colonisation par la végétation. Le dépôt, qui a une épaisseur moyenne de 40 cm, est ensuite redistribué par différents facteurs (l'eau, la pente, la vie). Sur ce substrat allochtone, le développement des sols prend une voie différente de celle de la pédogenèse calcaire à laquelle il faudrait s'attendre dans le Jura. Des mélanges sont possibles, entraînant des conditions particulières mélangeant les caractéristiques des deux voies, acide et calcaire (Havlicek, 1999).

Si ce travail ne présente aucun fait nouveau ou révolutionnaire, il apporte encore une fois la preuve, si besoin est, que les loess ont une importance considérable dans l'environnement jurassien. Effectuer des recherches pédologiques dans ces montagnes sans prendre en compte ce facteur ne semble aujourd'hui plus très pertinent. Dans notre cas, l'intérêt pour les loess s'est aussi vu renforcé par la difficile chronologie de mise en place des silex. En effet, si l'apport éolien est plus ou moins daté à la fin du Würm, le cas des silex n'est pas aussi clair. La présence des limons sous les clastites de silex permet de se faire une idée de ce qui s'est déposé en premier, même si beaucoup d'autres questions se posent encore.

Pour terminer sur les loess, il semble que de plus amples recherches soient nécessaires. En effet, aussi pionniers qu'aient été les travaux de Pochon, aucune véritable étude n'est venue les compléter depuis 30 ans. Or, il y aurait encore beaucoup à faire! Pochon a identifié plusieurs dépôts de loess,

provenant d'époques et d'endroits différents et ayant une composition distincte. Ces phases spécifiques pourraient être précisées et datées. En recherchant les moraines d'origine, du Würm ou du Riss et ce peut-être à travers toute l'Europe, il serait ensuite possible de caractériser chaque dépôt. Une base de données regroupant toutes les informations sur les loess et leurs caractéristiques serait sûrement du plus grand usage pour nombre de personnes !

Conclusions personnelles

Les objectifs de ce chapitre personnel, à savoir la description de la zone, peuvent difficilement être atteints ou ne pas l'être. Un certain nombre de résultats, de faits et d'hypothèses sont présentés dans le but de comprendre comment s'est mis en place ce paysage. Des facteurs prépondérants sont définis et des liens entre eux apparaissent. Les couches du paysages sont étudiées séparément, puis sont confrontées les unes aux autres. Des analyses un peu plus poussées sont effectuées sur les formations superficielles. Toutes ces pièces du puzzle s'assemblent en une hypothèse finale qui conclut ce chapitre, même si de nombreux points pourraient encore être approfondis.

En ce qui concerne les processus du Quaternaire et l'histoire des silex, de premières pistes sont lancées. Cependant, il est encore trop tôt pour tenter une synthèse car d'importants éléments sont dévoilés dans les pages à venir.

Chapitre 5

Pédologie

5.1 Introduction

5.1.1 Définitions

Ce chapitre ne peut commencer sans une certaine définition du "sol". De façon intuitive, c'est là où nous marchons, là où les plantes poussent. C'est d'ailleurs une des définitions du dictionnaire (BORDAS, 1995) qui propose : "couche superficielle de l'écorce terrestre considérée comme ce qui porte les êtres et les choses". Or cette vision est un peu réductrice quand nous avons à l'esprit, par exemple, l'existence de formations superficielles. Il est possible de trouver, toujours dans le même ouvrage de référence : "partie superficielle de l'écorce terrestre, qui résulte de la transformation de la roche-mère sous-jacente, telle qu'elle a été modifiée par divers processus chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et en fonction de la végétation". Même si cette définition n'est de loin pas parfaite (nous le remarquerons plus tard), elle confère au sol la possibilité de naître, d'évoluer et de mourir donc de vivre selon une genèse. En résumé, pour avoir un sol il faut une "pédo" (sol) "-genèse" (naissance, création) (BORDAS, 1995).

Pour affiner cette notion, il est nécessaire de définir quels sont les principaux facteurs d'évolution. Ils sont de deux types : physiques et chimiques (Duchaufour, 1972). Dans le premier cas, il s'agit par exemple du gel, qui peut fragmenter et redistribuer des objets. Il y a aussi l'eau qui est capable de transporter les particules, et surtout la vie qui brasse l'ensemble des horizons de surface, que ce soit par la faune ou par la flore. Pour le second facteur, c'est plus compliqué. Il est impossible de résumer ici les nombreux articles et livres qui parlent de ces phénomènes mais l'eau et le bios jouent un rôle prépondérant. Gobat *et al.* (2003) proposent dix-sept processus de pédogenèse, qu'ils soient de nature physique ou chimique.

5.1.2 Intérêts de la zone

L'étude d'une zone calcaire comportant des silex laisse à penser que deux mondes pédologiques doivent s'affronter. D'un côté, il y a le développement de sols où les carbonates dirigent la pédogenèse et empêchent, par exemple, l'acidification du profil (Pedro, 1972). De l'autre, un substrat siliceux permet une évolution vers les sols acides. Dans cette vision, une frontière nette doit délimiter les deux zones et être visible autant du point de vue pédologique qu'au niveau des végétaux calcicoles et calcifuges. Cependant, un autre acteur redistribue les données : le loess (Pochon, 1973). Celui-ci va tamponner le rôle des carbonates en les isolants physiquement des horizons supérieurs. La richesse des sols ne peut qu'être stimulée par cette diversité géologique. S'ajoute à cela une topographie accidentée proposant des points bas sous forme de dolines ou de talwegs et des points hauts formés de bosses ou de crêtes. Le régime hydrique du sol est donc variable suivant l'écoulement des eaux.

Dès lors, une typologie précise de l'ensemble des types de sols devient intéressante. Une vision statique de la couche édaphique du site n'est pas suffisante pour comprendre les liens et les rôles des sols dans le paysage. C'est pourquoi une enquête sur les processus passés et actuels complète la typologie classique des sols.

5.2 Etat de la recherche

Aucun travail analogue sur des sols avec des silex dans un massif calcaire n'a jamais été effectué, c'est pourquoi il est difficile de faire un vrai état de la recherche. En revanche, il est possible de trouver de nombreuses références portant sur des études de sols dans la chaîne du Jura avec notamment les problèmes liés à la présence de matériau allochtone (Pochon, 1973), la problématique de sols doubles (Havlicek, 1999), etc.

5.3 Objectifs

Le but est de faire une liste exhaustive de l'ensemble des types de sol présents dans la zone. En y rajoutant une étude sur les processus pédologiques, une vision dynamique est obtenue. Après avoir bien compris la couverture édaphique, il faut l'intégrer dans les autres échelles spatio-temporelles afin de voir la place qu'elle occupe dans le modelage du paysage.

5.4 Méthodologie

Les techniques utilisés sont celles apprises durant les travaux pratiques dispensés au sein des laboratoires "Sol & Végétation" (Gobat, 2006) et "Géodynamique de la Biosphère" (Verrecchia, 2006). Elles sont décrites dans les manuels correspondants (LEVP, 2001).

5.4.1 Le terrain

La première phase consiste à s'approprier le site d'étude. Elle est purement descriptive. Des fosses pédologiques sont ouvertes et décrites. Il y faut récolter des échantillons en fonction des objectifs visés. La première partie s'arrête ici.

5.4.2 Les analyses

La phase suivante est la vérification de la typologie des sols par des analyses en laboratoire. En effet, chaque type de sol remplit certaines conditions physico-chimiques propres mesurables expérimentalement. Il en va de même pour les processus : selon la présence ou l'absence de certains ions, il est possible de connaître l'évolution d'un sol (Bartoli *et al.*, 1979). Une analyse micromorphologique complète les résultats obtenus. Il faut, dès lors, traiter les différentes observations et valeurs obtenues pour interpréter le paysage édaphique et sa mise en place.

Il est possible d'affiner les résultats par une nouvelle campagne de terrain, accompagnée de quelques analyses en laboratoire moins complètes.

5.5 Matériel & Méthodes

Tout se fait en deux phases : le terrain et le laboratoire.

5.5.1 Le terrain

C'est sur le terrain que la première partie se déroule. Il faut s'imprégner du site, le comprendre. C'est pourquoi il est impératif de le parcourir avec une tarière, une carte géologique, un flacon de HCl et un pH-mètre Hellige afin de catégoriser les différents grands groupes édaphiques présents¹. Une fosse

¹sans être trop précis ; pour plus de détails se référer au chapitre 4 sur les formations superficielles.

d'un mètre carré est ensuite creusée pour chaque ensemble défini. Celle-ci est choisie selon la représentativité qu'elle apporte. La description s'effectue selon la technique apprise durant les travaux pratiques de pédologie et décrite notamment par Baize & Jabiol (1995) et reprise par Gobat (2006). Le premier horizon décrit est le OF s'il existe et le dernier la roche substrat. Les notes sont prises sur les fiches présentées à la figure suivante (FIG. 5.1).

PROFIL N°
 Données stationnelles : date de creusement du profil j mm aa Date de description : j mm aa
 Lieu : BE / lieu dit, CN n°1144, exposition: N, pente %, altitude : , coordonnées :
 Topographie :
 Activités humaines :
 Végétation :

Nom du sol										
Profondeur (cm)	Horizons	Squelette	Acidité / Carbonate	Texture	Structure	Activité biologique	Porosité	Couleur	racines	autres / remarques

FIG. 5.1 – Exemple de fiche utilisée durant la description des profils

Des horizons sont définis par leurs caractéristiques principales, comme la structure, la texture, le pH, le taux de squelette, etc. Un croquis général est dessiné afin de compléter la prise de photos. De plus, un échantillon de chaque horizon est prélevé pour réaliser des analyses en laboratoire. Des prélèvements par "boîtes de Kubiena" complètent l'échantillonnage pour l'observation en lame mince de la dynamique du fer et des argiles.

5.5.2 Les analyses

La typologie est ensuite affinée par des analyses en laboratoire. Les manipulations effectuées sont celles qui sont le plus souvent utilisées par les pédologues et certifiées par les normes AFNOR notamment. Elles sont décrites dans le protocole du laboratoire Sol & Végétation (LEVP, 2001) et les références bibliographiques s'y trouvent. La liste des différentes analyses et leurs principes suit ci-dessous.

pH H_2O : le but est de mesurer la concentration en ions H^+ libres dans la solution du sol qui représente l'acidité active. Une électrode est utilisée

pour connaître la charge en H^+ de la solution. Le mélange sol/liquide utilisé est de rapport 1/2, 5.

pH KCl : le principe est le même que pour le pH H_2O , mais c'est une solution de KCl 1M qui est utilisée. Les ions K^+ vont alors s'échanger avec les ions H^+ fixés sur le complexe argilo-humique et mettre ces derniers en solution. La nouvelle valeur mesurée est plus faible que celle de la solution aqueuse. C'est ce qu'on appelle l'acidité d'échange. La soustraction de l'acidité d'échange à l'acidité active donne l'acidité potentielle. Cela représente la quantité de ions H^+ fixés au complexe argilo-humique donnée en unité de pH.

Humidité résiduelle : le sol séché à l'air n'est pas complètement sec. Certains éléments sont très hydrophiles et captent l'eau présente dans l'air. C'est le cas notamment des argiles. Un passage à l'étuve à $105^\circ C$ permet de supprimer cette humidité. En général, les pédologues donnent les résultats des différentes analyses pédologiques en fonction du poids sec.

Granulométrie : le but est de déterminer la texture du sol répartie en cinq catégories : les argiles ($< 2 \mu m$), les limons fins et grossiers ($2 < 20 < 50 \mu m$) et les sables fins et grossiers ($50 < 200 < 2000 \mu m$). Les trois premières classes sont mesurées par sédimentation, les deux dernières par tamisage humide. Un traitement préalable doit se faire. Il faut détruire la matière organique et ensuite disperser les particules. L'eau oxygénée (H_2O_2) à chaud et l'héxamétaphosphate de sodium ($Na_6O_{18}P_6$) sont respectivement utilisés. Les sols rencontrés n'étant pas très carbonatés, une destruction en aval des ciments calcaires par HCl n'est pas utile.

Carbone organique : c'est la méthode Anne qui est choisie pour doser le carbone. Il faut oxyder la matière organique par ébullition d'un excès de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$). La réduction du chrome en milieu sulfurique libère de l'oxygène qui oxyde la matière organique. L'analyse continue par une titration du dichromate en excès avec du sel de Mohr. Le dichromate restant et le sel de Mohr forment un sel ferrique qui se colore en bleu-violet grâce à de l'acide diphénylaminosulfonique. Dès qu'un excès de Fe^{2+} (sel de Mohr) arrive, la solution tourne au vert. Le taux de carbone peut être surestimé car le dichromate de potassium réagit aussi avec le chlore, les nitrates, le bioxyde de manganèse et les carbonates.

Matière organique : la perte au feu permet de mesurer la quantité de matière organique perdue sous forme de CO_2 par chauffage de l'échantillon à $450^\circ C$. Il ne reste que la fraction minérale dans le creuset.

Azote total : la méthode Kjeldahl minéralise les formes organiques de l'azote pour donner de l'ammonium grâce à un mélange $H_2SO_4 - K_2SO_4$ et un catalyseur métallique (pastille Kjeldahl) qui sont chauffés. L'ammonium est ensuite distillé et titré sur le principe acide-base. Les nitrates ne sont pas dosés par cette méthode mais sont peu présents dans les sols acides.

Acides humiques - acides fulviques : la première étape consiste à séparer l'humine des acides humiques et fulviques. Pour ce faire une solution de $NaOH$ à pH 10 est employée, ce qui a pour effet de précipiter l'humine résiduelle. Après centrifugation, le surnageant qui contient les acides est récupéré. En y ajoutant de HCl , le pH chute à 1.5 et les acides humiques précipitent. On dose ensuite le carbone de trois fractions (sol-humine-acides humiques) par analyse CHN pour définir la proportion d'acides humiques et fulviques, ceux-ci calculés par différence.

Capacité d'échange cationique (CEC) : le but est de mesurer la capacité du sol à stocker et à libérer certains cations utiles pour les plantes. Le complexe argilo-humique est le réservoir important dans les sols. La fixation n'est pas liée à la chimie des ions mais plutôt à des phénomènes de surface, ce qui permet une grande mobilité des cations adsorbés. Le complexe argilo-humique est régi par deux lois :

- la somme des cations fixés et échangeables d'une unité de poids est constante,
- pour un cation donné, un équilibre s'établit entre les cations fixés et ceux qui sont libres dans la solution.

Une solution de KCl et une autre de NH_4Cl permettent de travailler au pH identique à celui du sol. Il est ensuite possible de doser les cations par AAS (spectrophotométrie par absorption atomique ; Ca , Mg , K et Na) et par titration de H^+ .

Calcaire total : une analyse des carbonates a été envisagée mais la faible quantité de carbonates trouvée sur le terrain par test HCl ainsi que par quelques essais au laboratoire ont supprimé cette manipulation. On s'attachera de préférence à la quantité de Ca^{2+} présent et dosé par FRX (voir plus bas).

Fer et aluminium : trois analyses sont retenues pour doser ces éléments :

- extraction au pyrophosphate de Na qui permet de mesurer Fe et Al présents dans les complexes organométalliques mobiles et immobiles importants dans la podzolisation (Fe_{pyro} , respectivement Al_{pyro}).
- extraction à l'oxalate (méthode TAMM) qui mesure Fe et Al complexés et amorphes (Fe_{ox} ; Al_{ox}).

- extraction au CBD (citrate-bicarbonate-dithionite de sodium) qui fait ressortir les formes cristallisées de *Fe* et *Al* en les solubilisant. Les formes libres, complexées et amorphes de ces deux éléments sont mesurées (Fe_{CBD} ; Al_{CBD}).

Afin de connaître les processus qui régissent les différents solums, trois ions sont définis comme marqueurs importants de la pédogenèse. Il s'agit du fer, du calcium et de la silice. Ce même choix se retrouve dans certains ouvrages (Bartoli *et al.*, 1979). Une observation en lame mince complète le travail.

Fluorescence RX (FRX) : les dosages se font sur des pastilles de poudre pressées de 4 cm de diamètre. Un tube RX à anode au Rhodium (Rh) est utilisé. Le faisceau balaie la surface de la pastille. Les minéraux présents sont excités et émettent, à leur tour, des RX qui sont captés et analysés.

Micromorphologie : il s'agit d'"un examen et interprétation des matériaux pédologiques et des assemblages qu'ils forment de façon microscopique et inframicroscopique" (Verrecchia, 2006). Pour ce travail, une description complète n'est pas effectuée. Une série de descripteurs importants comme les argilanes, les ferriargilanes ou les papules de gel est observée. Par contre, les vides et la matrice ne sont pas étudiés.

5.6 Résultats & Interprétations

Dans cette partie, la présentation des sols se fait en suivant un transect et non par l'ordre des numéros. En effet, il est plus logique de suivre une direction que de partir dans tous les sens au gré des envies du terrassier. Nous allons commencer de la crête sud pour rejoindre son homologue au nord. (FIG. 5.2)

Il n'est question que des profils ouverts durant la période de terrain. Pour avoir une vision d'ensemble des sols et de leur répartition, il faut se référer à la partie cartographie de cet ouvrage². Tous les résultats sont présentés par sol dans les annexes (annexe B.1 à annexe B.14). De ce fait, certaines précisions ne sont pas données ici, comme par exemple les coordonnées GPS. Les sols 6, 7, 8 et 9 font l'objet d'une excursion annuelle du Laboratoire Sol & Végétation, mais n'ont jamais été étudiés en laboratoire avant ce travail.

D'une manière générale, le terme β est utilisé de la même façon que pour les formations superficielles. Il s'agit d'un horizon d'altération. Enfin, il est

²chapitre 4.

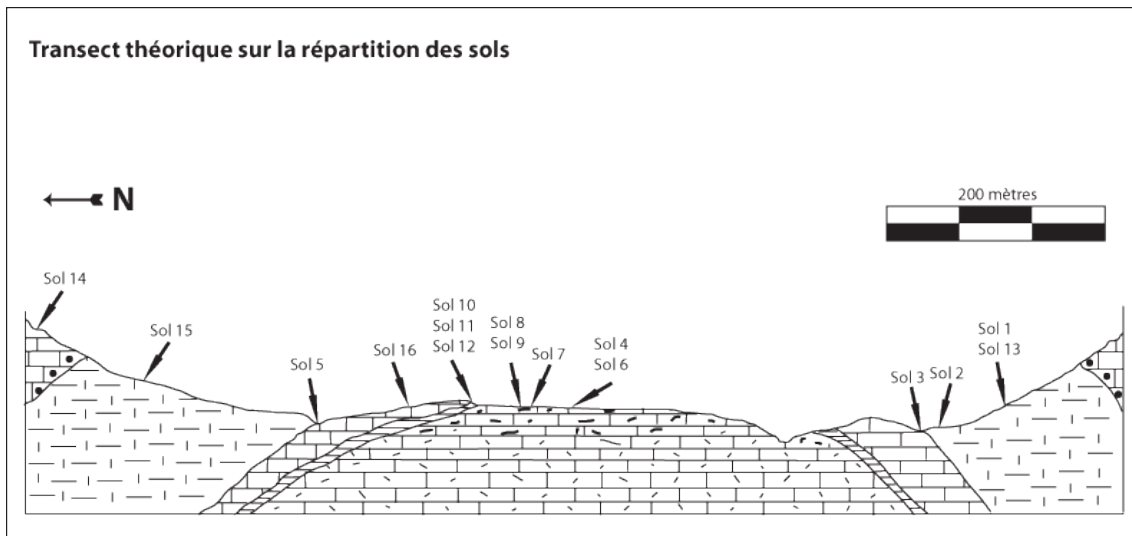


FIG. 5.2 – Position des sols selon une droite théorique nord-sud

fortement conseillé de se munir des annexes afin de mieux comprendre les descriptions qui suivent.

5.6.1 Sol 1 (PODZOSOL OCRIQUE - RÉDOXISOL soliflué) :

Il se situe dans un replat de la pente exposée nord, dans ce que nous avons appelé le "bourrelet à myrtilles". La végétation est principalement composée de *Picea abies* et *Vaccinium myrtillus*. Aucun élément grossier n'est visible en surface, que ce soient des blocs ou des cailloux calcaires. La séquence d'horizons décrite à partir du profil est la suivante : OF/AE/A/E/Eg/BPsg/Mm. Le profil est creusé après une longue période sèche.

- OF (0-14 cm) : composé de la litière apportée par *Vaccinium myrtillus*, *Picea abies* et des mousses. Son activité biologique est assurée par les racines de *Vaccinium myrtillus* et par des champignons. Le pH est de 4 (pH-mètre Hellige) et l'horizon est non carbonaté.
- AE (14-23 cm)(correspond à la référence 1.1 dans le tableau de résultat, annexe B.2) : cet horizon présente une texture limoneuse fine et une structure grumeleuse. Sa couleur est noir gris et vaut 10 YR 4/2 d'après le code Munsell. La quantité de racines diminue et ces dernières deviennent plus petites. Le pH H_2O est de 3.8. La perte au feu donne un taux de matière organique de 18% alors que le dosage du carbone organique vaut 17%. Avec une valeur faible en azote (0.4%), le rapport

- C/N est très haut (42) et dénote une faible activité biologique.
- A (23-28 cm)(1.2) : étonnamment, cet horizon d'apparence plus noire se situe en dessous du précédent. Sa couleur a une valeur de 10 YR 4/3. Il est encore plus acide que celui du dessus car son pH H_2O est de 3.6. La principale différence avec l'horizon AE est sans doute au niveau du taux de carbone organique qui baisse (12%) et surtout de la valeur d'azote qui double (0.8%). De ce fait, le rapport C/N varie énormément et vaut 15. La texture est identique alors que la structure passe de grumeleuse à grumeleuse subpolyédrique.
 - E (28-35 cm)(1.3) : les principales différences sont issues de la structure et de la couleur. Nous passons de quelque chose de meuble, facilement travaillable à un horizon plutôt compact. Le code Munsell donne une valeur plus claire qu'avant (10 YR 6/2) traduite par une teinte grise avec des taches plus foncées. La texture reste très limoneuse (76% de limons). L'activité biologique est invisible dans cet horizon. Le taux carbone organique est presque nul (1.5%).
 - Eg (35-47 cm)(1.4) : il ressemble en tout point au précédent, si ce n'est que les taches noires sont remplacées par d'autres de couleur rouille. Le code Munsell vaut 10 YR 7/2.
 - BPsg (47-62 cm)(1.5) : cet horizon est singulier. D'une part, il présente un aspect de zone de battement de nappe. Il est de teinte bleutée avec de nombreuses taches rouille (Munsell 2.5 Y 7/2). D'autre part, une augmentation de l'aluminium sous forme organominérale est mesurée. La texture devient argilo-limoneuse et la structure reste identique. Le pH H_2O remonte à 5.9 et on retrouve une certaine activité biologique par la présence de racines de taille moyenne à grande.
 - Mm (47-... cm) : cet horizon est fortement carbonaté (4/4 au test HCl) et un pH de 7 est mesuré (pH-mètre Hellige). Sa couleur est jaunâtre. C'est un horizon meuble composé par les marnes de l'Argovien.

Un problème, le nom

La première difficulté pour nommer ce sol provient de la probable solifluxion de ce solum : sous le OF, il y a un horizon plus clair (AE) puis une couche plus foncée (A). Comment expliquer cette différence de couleur ? La première possibilité est un enrichissement en matière organique. La perte au feu vient confirmer cette hypothèse. Or la source de matière organique se situe dans l'OF, donc l'horizon AE (1.1 dans les tableaux de résultats) devrait être plus organique que le A (1.2) dans une vision d'enfoncement progressif décrit entre autre par Legros (2007). Une différence granulométrique peut aussi éclaircir le AE. En effet, si la texture devient plus grossière, par exemple plus riche

en sable de quartz, l'horizon va s'éclaircir. Mais cette solution est à rejeter car la granulométrie montre une texture quasiment identique. Enfin, la zone supérieure de battement de nappe peut blanchir l'horizon mais dans le cas présent, la nappe ne monte pas si haut. Des apports sub-autochtones par ruissellement diffus semblent être une bonne solution. Pour appuyer cette hypothèse, il est possible de décrire notamment la topographie et la végétation de la zone de creusement. Dans une pente relativement constante, on retrouve en montant une petite butte d'un mètre de haut, puis un replat et enfin la pente qui recommence. C'est un bourrelet de solifluxion. Pour ce qui est de la végétation, des espèces calcifuges ne poussent que sur ce monticule, ce qui tend à démontrer qu'une différence d'épaisseur de substrat isole les plantes des marnes calcaires de l'Argovien sous-jacentes³.

Un second problème dans la dénomination de ce profil est la présence d'une zone de battement de nappe. Elle "affecte la morphologie et les caractéristiques analytiques des PODZOSOLS", selon le *Référentiel pédologique* (AFES, 1995). Il y a une perte en fer par réduction de Fe^{3+} en Fe^{2+} qui est plus mobile et est évacué du profil. De plus, la complexation entre des composés organiques et le fer se fait de préférence entre des acides humiques ou/et fulviques et le fer ferreux. Ces chélats ainsi formés sont, eux aussi, mobiles et peuvent être emportés par chéluviation (Gobat *et al.*, 2003). Ces deux phénomènes ont pour conséquence d'appauvrir le sol en fer. Le rapport $Fe_{ox\ ou\ pyro}/Al_{ox\ ou\ pyro}$ (soit les formes les plus mobilisables) est le plus faible de tous les sols de la zone d'étude pour les deux horizons présentant des traces d'oxydo-réduction. L'aluminium et les complexes alumino-organiques sont plus stables face à cette anoxie possible (Bouyer *et al.*, 1978). Il faut donc observer la podzolisation à travers l'aluminium et non le fer tout en gardant en tête que l'aluminium est mobilisé plus rapidement que le fer et peut donc traduire une évolution plus marquée (Duchaufour, 1983; Righi, 1984). L'aluminium extrait avec une solution de pyrophosphate (Rouiller, 1981) puis dosé donne une mesure sur la quantité de complexes organo-métalliques traduisant la podzolisation (Gobat *et al.*, 2003). Il y a une augmentation de la concentration des chélats dans l'horizon PBsg par rapport à l'horizon Eg (1.4). La conclusion est qu'il y a bien podzolisation. Mais est-elle vraiment encore d'actualité lorsqu'il y a des battements de nappe? La réponse est oui. Le processus ne se fait plus en majorité par le fer mais par l'aluminium.

Il s'agit donc bien d'un PODZOSOL OCRIQUE - RÉDOXISOL soliflué.

³voir le chapitre 4.

5.6.2 Sol 13 (PODZOSOL OCRIQUE - RÉDOXISOL soliflué) :

Ce sol appartient aussi au "bourrelet à myrtilles", mais la topographie est pentue. Le profil est creusé sur le bord. La végétation est identique à celle du sol 1. Il n'y a pas de pierres ou autres blocs en surface. Le profil est de type OF/OH/E/BPs/BPsg/BPsg/Cca/Mm.

- OF (0-9 cm) : cet horizon est très noir (10 YR 2/2) et de nombreuses racines le parcourent (4.5/5). Le pH-mètre Hellige donne une valeur de 4. Le tapis de mousses présent en surface est le principal fournisseur en matière organique de cet horizon.
- OH (9-21 cm)(13.1) : il garde la même teinte que l'OF (10 YR 2/2). Par contre le taux d'enracinement est plus faible (3/5). Le pH H_2O vaut 3.7. La faible activité biologique est démontrée par le rapport C/N (24.7).
- E (21-27 cm)(13.2) : la transition avec OH est relativement nette. Il est de teinte grise (10 YR 6/2). Sa densité augmente, ce qui transparait par une porosité apparente plutôt faible. Aucune racine n'est présente et il n'y a pas de trace d'activité de la pédofaune. La structure est polyédrique mais très compacte et la texture est limoneuse très fine. Le taux de carbone chute de 18.6% pour l'horizon OH à environ 2% pour le E. Par contre le rapport C/N est relativement identique (23.4).
- BPs (27-38 cm)(13.3) : La couleur, avec son marbrage orangé-gris-noir (10 YR 6/4) marque un changement radical. La texture est limoneuse fine argileuse. La structure est composée de grands polyèdres d'une dizaine de centimètres et de type conchoïdal avec de la matière organique sur les faces. A nouveau, l'activité biologique n'est pas visible dans le profil : il n'y a ni galerie, ni racine. Le pH H_2O est bas et vaut 3.8. Malgré la présence visible de matière organique sur les faces des polyèdres, le taux en carbone organique n'est que de 1%.
- BPsg (38-50 cm)(13.4) : il y a très peu de différence avec l'horizon précédent sauf sur deux aspects : premièrement la texture devient de plus en plus argileuse pour arriver à un type argilo-limoneux. Deuxièmement la présence de traits d'hydromorphie permet d'affirmer qu'il y a un battement de nappe. De ce fait, la couleur passe à des tons plus jaune et le code Munsell donne 2.5 Y 7/8.
- BPsg (50-65 cm)(13.5) : à nouveau, les différences avec l'horizon supérieur sont faibles. La texture est argileuse et la structure toujours identique. Seule la présence de matière organique sur les faces des polyèdres augmente.
- Cca (65-75 cm) : cet horizon présente des caractéristiques bien différentes de celles situées en dessus. Il est carbonaté et fait donc effe-

vescence à HCl (3/4). Son pH est neutre d'après le pH-mètre Hellige. Des éléments grossiers carbonatés dont la taille varie du caillou au bloc se trouvent dans une matrice argileuse de couleur jaunâtre issue des marnes de l'Argovien.

- Mm (75-... cm) : tout à fait identique au précédent, il ne diffère que par l'absence d'éléments grossiers.

La même problématique que dans le sol 1 se pose. Ce profil est décrit dans le même bourrelet de solifluxion. La suite des couches est logique dans la perspective de le nommer PODZOSOL OCRIQUE - RÉDOXISOL . Aucune inversion d'horizons ne s'y trouve, ce qui dénote une certaine stabilité. En revanche, une couche de pierres carbonatées (Cca) surmontant les marnes (qui ne contiennent aucun élément grossier, Mm) atteste que du colluvionnement s'y est produit auparavant. Pour le reste, les remarques du sol 1 sont valables à la différence que l'hydromorphie semble y être moins importante. Le fer s'y trouve en plus grande quantité et la couleur bleutée de l'horizon 1.5 ne se voit pas ici. Nous pourrions envisager de le nommer PODZOSOL OCRIQUE rédoxique, bien que cela n'apporte pas de nouveaux éléments.

De la matière organique en profondeur

L'autre sujet intéressant de ce sol est la présence de matière organique en profondeur. Après une discussion avec M. Roger Langohr de l'Université de Gand, il s'avère que la structure est de type conchoïdal liée à une alternance de gel et de dégel. Il s'agit de polyèdres très compacts car comprimés par l'eau gelée. Cette organisation crée des vides lors de la fonte des neiges et permet ainsi à de la matière organique de ruisseler jusqu'en profondeur et de se déposer sur les faces des polyèdres. Le rapport AF/AH obtient une valeur de 41.5 dans l'horizon 13.5, ce qui est considérable. La couleur noire en profondeur provient donc de la présence en grande quantité d'acides fulviques et surtout d'humine d'héritage.

Malgré quelques caractéristiques propres, les conclusions sont identiques à celles du sol 1.

Le sol 13 est aussi un PODZOSOL OCRIQUE - RÉDOXISOL soliflué.

5.6.3 Sol 2 (RÉDOXISOL à substrat meuble) :

Situé presque en bas de la pente exposée au nord, ce profil se trouve au milieu d'une végétation hydrophile. Il y pousse notamment *Caltha palustris*, différentes espèces de *Salix* et *Filipendula ulmaria*. La séquence A/Ag/g/Mm le classe dans les sols à caractère hydromorphe. Le profil est creusé après une

très courte période de pluie.

- A (0-15 cm)(2.1) : cet horizon est relativement noir (10 YR 3/2). Les racines y sont nombreuses (3/5) et les vers de terre semblent s'y plaire, n'étant pas trop agressés par l'acidité du sol (pH H_2O de 6). La texture est limono-argileuse fine et la structure est grumeleuse bien que plastique. Le taux de carbone organique est de 8% et l'activité biologique mesurée par le rapport C/N (14) est bonne. Il peut être décrit comme un anmoor qui peut être ajouté comme qualificatif au nom du sol : RÉDOXISOL à anmoor sur substrat meuble.
- Ag (15-26 cm)(2.2) : malgré une teinte plutôt foncée, des taches grises et rouille apparaissent, dénotant une zone de battement de nappe. Le taux d'enracinement est faible (1/5). La présence de vers de terre laisse penser qu'il y a une bonne activité biologique. Le rapport C/N confirme cela avec une valeur de 13.4. La texture est identique au A et la structure est plutôt plastique mais avec encore quelques grumeaux. Côté pH, la neutralité est proche avec le pH H_2O à 6.5.
- g (26-40 cm)(2.3) : la matière organique n'atteint plus cet horizon. La couleur est marbrée gris rouille et le code Munsell est 2.5 Y 5/4. L'activité biologique apparente est presque nulle. L'horizon est carbonaté et le pH H_2O vaut 7.6. La texture est argilo-limoneuse et la structure massive est très plastique.
- Mm (40-... cm) : cet horizon est de couleur beige. Il est composé d'une matrice argileuse englobant des cailloux calcaires altérés. L'effervescence à HCl est de 4/4 et le pH de 7 d'après le pH-mètre Hellige.

Du classique

Ce sol n'a rien de particulier. Il présente les caractéristiques classiques d'un RÉDOXISOL. Il se développe sur un substrat imperméable que sont les marnes de l'Argovien. Le fait qu'il se situe dans une pente empêche la présence d'une nappe d'eau permanente.

5.6.4 Sol 3 (RÉDUCTISOL TYPIQUE acide à anmoor) :

Ce sol se trouve dans le talweg le plus au sud. La particularité de ce dernier est de présenter une doline tous les dix à quinze mètres. Malgré ces exutoires, l'eau joue un rôle prépondérant dans la pédogenèse de ce solum. Il est décrit de la façon suivante : OFr/A/AnGr1/AnGr2/Grh1/Grh2/Gr/Mm. Il faut préciser quelques points. D'une part la fosse est creusée le même jour que le sol 2. Le lendemain, la totalité du profil est rempli d'eau et seuls surna-

gent les horizons OFr et A. D'autre part, vu la quantité de bois trouvée dans certains horizons, il est possible de croire qu'un arbre a poussé à proximité mais qu'il est mort à ce jour.

- OFr (0-1 cm) : cet horizon formé par les mousses possède un pH légèrement supérieur à 5 d'après le pH-mètre Hellige. La terre fine est de couleur noire et parcourue de nombreuses racines de bryophytes (4/5).
- A (1-7 cm)(3.1) : L'abondance en vers de terre et en racines traduit une bonne activité biologique, confirmée par le rapport C/N (12.7). La couleur noire donne un code Munsell de 10 YR 4/2. Il n'y a pas de carbonates et le pH H_2O vaut 4.9. La texture argilo-limoneuse et la structure grumeleuse appuient la vision d'un horizon organo-minéral.
- AnGr1 (7-59 cm)(3.2) : c'est le premier horizon d'où l'eau suinte. La charge en limons est plus faible et la texture est argileuse. De plus, la teneur en matière organique (15.6%) et l'humidité rendent la structure très plastique. De couleur générale plutôt foncée (10 YR 3/2), une teinte bleu gris est tout de même visible. De nombreux bouts de bois, parfois de grande taille, sont sources de petites fibres.
- AnGr2 (59-67 cm)(3.3) : il est encore plus foncé que le précédent (10 YR 2/2) mais la légère teinte bleu gris est toujours décelable. Les gros morceaux de bois laissent la place à de nombreuses petites fibres. Des racines fines sont présentes dans cette couche. Le pH H_2O est en constante augmentation et se situe à 5.2. Du point de vue de la texture et de la structure, aucun changement n'est à signaler.
- Grh1 (67-81 cm)(3.4) : à partir de cet horizon, les racines ne poussent plus. Aucun ver de terre n'est trouvé. Le taux de matière organique est encore relativement haut pour un horizon de cette profondeur et atteint 9.8%. La teinte en est influencée. Elle se rapproche du gris mais reste assez foncée (10 YR 4/2). La texture évolue vers quelque chose de plus argilo-limoneux et la structure reste très plastique.
- Grh2 (81-100 cm)(3.5) : Le taux de matière organique continue à chuter en descendant le long du profil et se situe à 2.8%. La couleur est plus claire (10 YR 7/2). Le pH H_2O vaut 5.5 et l'horizon ne présente toujours pas de signe carbonaté. Le taux d'argile diminue encore et la texture est alors limono-argileuse fine.
- Gr (100-140 cm)(3.6) : la limite de cet horizon est très nette. La teinte change radicalement pour devenir bleu gris (2.5 Y 6/4), ce qui est typique d'un gley. Le pH H_2O augmente (6.2) mais aucune réaction à HCl n'est décelée. La texture est limono-argileuse fine.
- Mm (140-... cm) : la transition est aussi très marquée. La couleur est gris beige. Des cailloux calcaires s'y trouvent enrobés dans une matrice

argileuse à effervescence HCl de 3/4.

Accumulation

Malgré son nom, il offre une particularité "atypique" en plus de son acidité. Le *Référentiel pédologique* (AFES, 1995) décrit que l'anmoor peut atteindre 30 cm d'épaisseur. Ici, il descend jusqu'à 67 cm. Il est possible d'expliquer cette différence par le positionnement du sol par rapport à la topographie. Etant situé dans le fond d'un talweg, il est fort probable que des apports en matière organique sub-autochtones arrivent régulièrement par ruissellement lors de la fonte des neiges ou de violents orages. De plus, ce sol paraît engorgé une grande partie de l'année. En effet, la nappe se situe à une dizaine de centimètres de la surface malgré une période sèche relativement longue d'un mois. Cette anoxie a comme conséquence de ralentir la dégradation de la matière organique par un déficit en oxygène et favorise son accumulation. De plus, la quantité de matière organique est accentuée par la présence de branches d'arbres et autres racines qui se dégradent.

5.6.5 Sol 6 (PODZOSOL OCRIQUE sur BRUNISOL OLIGOSATURÉ) :

Ce sol (ou ces sols!) se situe dans une forêt d'épicéas poussant au milieu de silex. Le sous-bois est dominé par *Vaccinium myrtillus*, *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mass* et *Dryopteris dilatata*. D'après des recherches historiques, les arbres sont vieux de 200 ans environ. La pente est très faible pour l'ensemble de la forêt. Le profil est décrit avec les horizons suivants : OH/AhE/AE/EXp/BPh/BPsIIS/IIS/II(I) β 1/II(I) β 2/II(I)Rca⁴. Pour des raisons pratiques, le prélèvement des horizons est effectué de la manière suivante : OH est analysé dans le chapitre sur les formes d'humus⁵, AhE, AE et EXp sont regroupés sous 6.1 (annexe B.6) car il est impossible de les séparer lors du prélèvement d'horizons. Ensuite nous reprenons comme suit : BPh est le 6.2, BPsIIS est le 6.3 et 6.4 car deux échantillons sont prélevés dans cet horizon, le premier dans le haut et le second dans le bas, 6.5 pour le IIS et 6.6 pour le II(I) β 1.

- OH (0-5 cm) : il est très noir et acide (pH 4 selon le pH-mètre Hellige). Il y a des restes de *Polytrichum formosum* et la couche est traversée par de nombreuses racines. Le squelette est composé de graviers et de pierres de silex dans une abondance de 2/5

⁴l'utilisation des parenthèses sera justifiée plus loin dans ce chapitre.

⁵chapitre 6.

- AhE (5-16 cm)(6.1) : c'est avant tout les silex qui dominent (taux de 4.5/5). Le squelette est constitué de graviers, de cailloux et de pierres. La terre fine est noire (10 YR 6/1 pour le mélange AhE/AE) et, pour l'essentiel, collée aux racines. Sa texture est limoneuse fine et sa structure grumeleuse. Le pH H_2O est bas (3.6). Les racines y sont abondantes (4/5) et de taille moyenne à fine. L'activité biologique observée notamment avec la présence de nombreux vers de terre est mesurée avec un rapport C/N de 15, ce qui est moyen. Le rapport des acides fulviques sur les acides humiques (AF/AH) vaut 1.7
- AE (16-43 cm)(6.1) : il ressemble beaucoup au précédent mais la teinte générale de la terre fine est plus grise du point de vue descriptif. Pour des raisons techniques, il fait parti de l'horizon 6.1 concernant les analyses en laboratoire.
- EXp (43-68 cm)(6.1) : il n'y a que des silex (abondance de 5/5). Leur taille varie du gravier à la pierre. Quelques grosses racines sont observées (1/5).
- BPh (68-95 cm)(6.2) : la terre fine est à nouveau présente et elle enrobe les éléments grossiers. Humide, elle est de couleur brun rose (10 YR 5/6 en teinte sèche). Le squelette est toujours dominant (4/5) et il est possible de trouver, en plus des petites classes, des blocs de silex. La texture est limoneuse et il n'y a pas vraiment de structure décelable. Les traces d'activité biologique ne sont pas visibles. On dénote une forte augmentation du rapport AF/AH (36).
- BPsIIS (95-136 cm)(6.3 et 6.4) : le squelette diminue (2-3/5) et est constitué de graviers et de pierres de silex. Des racines sont visibles (1/5). La texture est limoneuse fine et la structure légèrement subpolyédrique. Le rapport AF/AH reste élevé (21.7) mais plus faible que dans l'horizon précédent.
- IIS (136-147 cm)(6.5) : il ressemble à l'horizon BPsIIS mais le taux de squelette augmente un peu (3-4/5). La texture devient limoneuse et la structure est mal définie mais elle est du type subpolyédrique. Le pH H_2O passe de 5.1 à 6.1.
- II(I) β 1 (147-166 cm)(6.6) : La présence de squelette carbonaté issu de Rca est pour la première fois mis en évidence. Le pH continue sa remontée pour arriver à 6.6 (pH H_2O). La texture devient clairement plus argileuse pour s'établir à limono-argileuse. La structure est plus pâteuse et plastique. La teinte générale est plutôt jaunâtre (10 YR 5/6).
- II(I) β 2 (166-167 cm) : Cet horizon plaque le II(I)Rca. Il est très argileux et fortement carbonaté (effervescence HCl 3/4).
- II(I)Rca (167-... cm) : c'est une roche du Callovien, la Dalle nacrée. Elle est altérée sur quelques millimètres.

Un problème temporel lié aux silex

La première question est de savoir si les silex permettent un développement édaphique et si c'est le cas, d'en comprendre les processus. Nous utilisons le fer et l'aluminium comme traceurs principaux pour démontrer qu'il y a pédogenèse et que celle-ci est de la podzolisation. Les plus fortes valeurs de fer et d'aluminium extraits dans une solution de pyrophosphate se situent dans les horizons BPh et BPsIIS (6.2, 6.3), ce qui est en relation avec le rapport AF/AH qui est maximum dans le BPh et légèrement inférieur dans le BPsIIS. Il y a chélation entre le fer ou/et l'aluminium et les acides organiques, puis migration. D'après McKeague (n.d.), le taux d'aluminium extrait à l'oxalate est maximum pour le BP. Cela se vérifie, tout en gardant à l'esprit que l'aluminium a tendance à migrer plus fortement que le fer, ce qui peut expliquer le taux élevé en aluminium extrait à l'oxalate pour l'horizon 6.4. Il y a donc podzolisation. Les différences de couleur entre les BP plaçant plutôt ce sol dans les PODZOSOLS OCRIQUES que dans les PODZOSOLS MEUBLES. Au contraire, les analyses en laboratoire montrent des différences marquées entre les horizons. Dans ce travail, nous nous rattacherons dans la mesure du possible au nom proposé sur le terrain.

Comment expliquer la présence de silex sous forme de biefs sur un sol apparemment de type BRUNISOL ? La première démarche est de regarder s'il s'agit d'un paléosol. Tout d'abord, l'étude précise sur la minéralogie effectuée⁶ fait ressortir que l'horizon II(I) β 1 (6.6) provient de l'altération de la Dalle nacrée. La granulométrie minérale montre une augmentation du taux d'argile en profondeur. Or aucune trace d'illuviation n'est observée dans les lames minces de ce sol. Cela confirme que les argiles sont *in situ*. Ensuite, l'horizon 6.5 est clairement éolien, alors que les 6.2 et 6.3 montrent un mélange de matériau autochtone avec une composante éolienne dominante. En observant les différentes formes de fer, la première remarque est que les formes les mieux cristallisées se retrouvent dans le fond du profil (BPsIIS/IIS/II(I) β 1) ce qui correspond aux horizons 6.4, 6.5, 6.6) et sont probablement recristallisées ou en partie héritées de la Dalle nacrée, ce qui ne correspond pas à de la podzolisation. En descendant dans le profil à partir de l'horizon 6.3, une légère structure est visible. Il est donc possible d'affirmer qu'une pédogenèse a eu lieu. Cette dernière a structuré certains horizons, ce qui nous rattache aux BRUNISOLS.

⁶se rapporter aux pages concernant les analyses minéralogiques aux RX, chapitre 4.

Un ou deux ?

Mais pourquoi voir ce profil comme deux sols et non un seul ? Une pédogenèse unique peut très bien développer un sol de 170 cm. Cependant, plusieurs preuves semblent contredire cette hypothèse. Les silex se situent à l'origine dans la dalle nacrée. Il faut de l'altération pour les libérer. Dès lors, pourquoi ne les retrouve-t-on pas piégés dans le résidu d'altération ? En fait, c'est le cas pour ceux présents dans les horizons inférieurs au BPh compris. Pour retrouver des silex sans matrice englobante (horizon EXp), il a fallu soit un événement poussant le ruissellement diffus à l'extrême, soit une migration post-brunification les mettant en place. Après discussion avec les différents protagonistes ayant pris part à ce travail et selon toute vraisemblance, c'est la seconde solution qui est correcte. Voici l'histoire probable de ce sol : à la sortie du Würm (-18'000 ans) des loess se déposent sur les sommets de la chaîne du Jura qui sont libres de glace (Pochon, 1978). Pendant la période chaude du Bölling-Alleröd (-14'600 à - 12'900 ans), un sol se développe dans les épaisseurs de loess et altère la Dalle nacrée, mettant en place un BRUNISOL. Puis un nouvel événement froid (Dryas III, -12'900 à - 11'500 ans), mobilise des silex se trouvant en surface et en amont par un mouvement de scree slope dû au gel. Il y a probablement érosion des horizons de surface. Dès la fin du Dryas III, la végétation peut recoloniser les silex et une nouvelle pédogenèse débute. Les silex ne sont probablement pas purs, ils contiennent encore une part de Dalle nacrée dans leur gangue ou collée sur leurs faces, voire même du squelette calcaire. Ce sont ces impuretés qui sont à l'origine de la part minérale autochtone des horizons BPh (6.2) et BPsIIS (6.3). Dans un premier temps, cet apport en carbonate ralentit la pédogenèse acide. L'horizon EXp étant très percolant, la perte en ions est très rapide. Très vite, une nouvelle pédogenèse podzolisée débute.

Bartolome (1990) propose que si le ratio $F_{e_{pyro}}/F_{e_{CBD}}$ est inférieur à 0.1, il s'agit de BRUNISOLS et s'il est supérieur à 0.2 nous avons affaire à des PODZOSOLS. Entre ces deux valeurs, il est probable de trouver des formes acides et évoluées de sols cambiques. Dans le cas présent, les horizons BPh et BPs obtiennent une valeur supérieure à 0.2 et les horizons sous-jacents, des rapports entre 0.1 et 0.2. Il est donc légitime de penser que ce solum est polyphasé, ce qui justifie le nom.

L'horizon EXp est un peu spécial. Actuellement, il ne joue plus de rôle majeur dans l'évolution du sol, si ce n'est par sa grande percolation. Il faut le voir comme un vrai horizon éluvial composé uniquement de sable de quartz sauf qu'ici le sable est remplacé par du squelette grossier, d'où le Xp. Le E est tout de même justifié car il y a eu une perte dans cet horizon au profit de ceux situés en dessous.

Le nom le plus correct pour ce sol est PODZOSOL OCRIQUE à horizon pierrique sur BRUNISOL OLIGOSATURÉ. Pour des questions de simplicité, nous garderons le nom proposé dans le titre de la sous-section.

Analyses statistiques

Une analyse en composantes principales est réalisée pour ce sol (FIG. 5.3 et FIG. 5.4). Elle montre clairement une différence entre l'horizon 6.5 et l'horizon 6.6. Plusieurs éléments expliquent la divergence : la présence de smectites, de Ca^{2+} et d'hydroxy- $Al-Fe$ dans l'horizon 6.6 qui déterminent un horizon autochtone ; la chlorite, la silice, Fe^{3+} et Al^{3+} fortement lié à l'horizon 6.5 et à l'allochtonie. Les autres horizons analysés sont influencés par une dominante éolienne et une texture préférentielle (0.032 - 0.05 mm) identique au 6.6. Ceci confirme l'hypothèse que le BRUNISOL s'est développé dans des loess. Puis un apport de résidu insoluble de la Dalle nacrée se mélange au premier substrat.

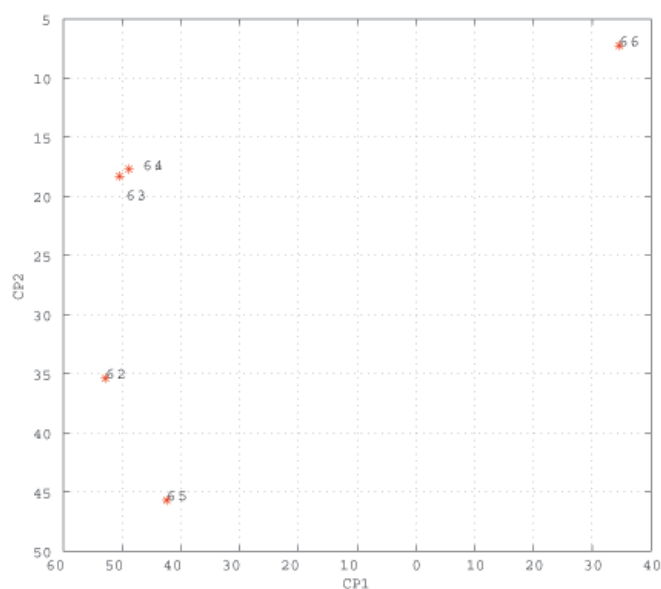


FIG. 5.3 – Représentation des échantillons selon CP1 et CP2.

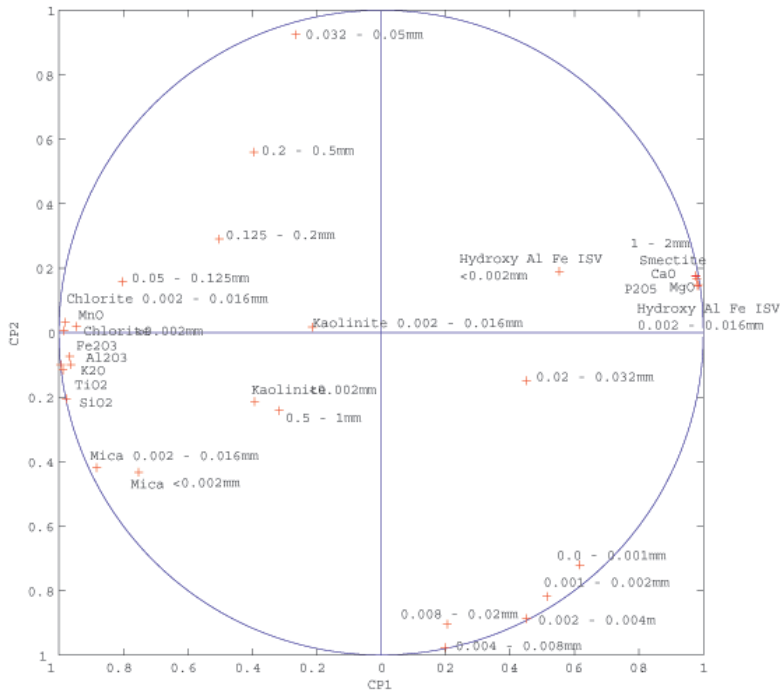


FIG. 5.4 – Cercle de corrélation des variables selon CP1 et CP2.

5.6.6 Sol 7 (PODZOSOL OCRIQUE) :

Ce profil est creusé dans les silex. L'environnement général ne change pas, si ce n'est que la quantité de silex apparents en surface est bien moins importante que pour le sol 6. Sa séquence AE/E/BPh/BPs1/BPs2/IIRsi/IICsi/(II) β /(II)Rca le classe dans les PODZOSOLS OCRIQUES. La zone de prélèvement des horizons ne correspond pas tout à fait avec la zone de description. L'horizon E est très visible à l'endroit du prélèvement alors qu'on le devine là où le profil est décrit.

- AE (0-4 cm)(7.1) : c'est un horizon noir avec passablement de sables de silex qui lui confèrent une teinte plus grise (10 YR 5/2). Le pH y est acide (pH H_2O de 3.7). On y trouve quelques vers de terre et de nombreuses racines (4/5). L'activité biologique semble excellente car le rapport C/N vaut 7.6. Le squelette est uniquement composé de graviers et de cailloux de silex avec une abondance de 3/5. Sa texture est limoneuse fine et sa structure clairement grumeleuse. La limite avec l'horizon sous-jacent ondule. Le E est visible seulement par endroit, surtout sur la droite du profil.

- E (4-19 cm)(7.2) : lorsqu'il existe, sa texture est limono-sableuse et il n'y a pas de structure. Il est de couleur claire (10 YR 6/3). Le Fe_{pyro} obtient une valeur faible ($2.7 \text{ }^0/_{00}$).
- BPh (4-19 cm)(7.3) : il peut descendre un peu plus bas s'il y a présence d'un horizon E. Il a une teinte brune légèrement violacée (10 YR 5/4) et son pH H_2O vaut 3.8. Sa texture est limoneuse et sa structure sub-polyédrique. Il contient des silex de la taille de graviers jusqu'à des pierres (abondance 3/5). Le Fe_{pyro} explose avec un taux à $22.5 \text{ }^0/_{00}$.
- BPs1 (19-58 cm)(7.4) : la teinte générale (10 YR 5/6) change de façon assez nette avec l'horizon supérieur. La pierrosité diminue (2/5) mais la taille du squelette minéral reste identique. Il y a toujours des racines. Elles sont de taille moyenne et pas très abondantes (2/5). La texture est limono-argileuse et la structure est particulière. Elle n'est pas massive ni polyédrique, mais est composée de petits agrégats peu stables. La transition avec l'horizon suivant n'est pas très marquée.
- BPs2 (58-81 cm)(7.5) : cet horizon paraît plus argileux au toucher, ce qui n'est pas confirmé par la granulométrie qui donne une texture toujours limono-argileuse. Le pH H_2O est identique à celui de l'horizon précédent et vaut 4.6. La teinte ne varie pas non plus.
- IIRsi (81-106 cm) : la couche suivante est constituée d'une dalle siliceuse, légèrement fissurée, qu'il faut casser à la barre à mine. Un enduit argileux remplit les fissures.
- IICsi(II) β (106-139 cm) : cette fois, les silex sont de plus petite taille (gravier à pierre) et une pelle permet de les sortir, bien qu'une matrice argileuse les lie fortement les uns aux autres. De plus, il y a quelques cailloux carbonatés.
- (II) β (139-140 cm) : comme dans tous les sols sur Dalle nacrée, il y a un horizon argileux carbonaté d'un centimètre.
- (II)Rca (140-... cm) c'est de la Dalle nacrée altérée sur quelques millimètres et présentant des fissures.

Rareté jurassienne de type classique

Ce sol possède toutes les caractéristiques d'un PODZOSOL, que ce soit du point de vue descriptif ou analytique. La valeur de Fe_{pyro} est faible dans le E (7.2). Elle augmente dans les horizons suivants, surtout dans le PBh. Tous les rapports présentés dans le sol précédent convergent vers les PODZOSOLS. Toutefois, une discussion sur le nom du sol est possible. Il est envisageable de l'appeler PODZOSOL MEUBLE en fonction des résultats des analyses en laboratoire qui dénotent de fortes variations entre les couches. Cependant, la différence descriptive entre les horizons étant faible, l'adjectif OCRIQUE est

préférée. La structure encore visible provient de probablement d'un BRUNISOL repris par de la podzolisation.

5.6.7 Sol 8 (PODZOSOL OCRIQUE) :

Il est creusé à quelques mètres du profil n°7. Au niveau de la station, rien ne change. Sept horizons sont décrits : OH/AE/BPh/BPhBPs/BPs/(II) β /(II)Rca.

- OH (0-6 cm) : l'horizon est très noir et la texture "grasse" et soyeuse est conférée par la matière organique. Il n'y a pas de squelette minéral mais passablement de racines fines et quelques-unes de grosse taille (3-4/5).
- AE (6-11 cm)(8.1) : il est toujours relativement noir mais une teinte plus claire est visible (Munsell de 10 YR 2/2). Cet horizon est très acide, le pH H_2O vaut 3.4. La texture est limoneuse fine et la structure est grumeleuse. Cette impression de gras due à la matière organique est gardée. Il y a moins de racines (2/5) mais on note la présence de cailloux de silex (abondance de 2/5). Le rapport C/N n'est pas très bon (17.6).
- BPh (11-17 cm)(8.2) : la limite est nette. La teinte auparavant foncée devient plus claire, brun violacé (10 YR 5/3). Il y a plus de silex (3/5) mais leur taille reste identique. Les racines sont plus grosses et leur densité est constante (2/5). La texture est limoneuse fine et la structure polyédrique.
- BPhBPs (17-27 cm)(8.3) : c'est un horizon de transition. Les silex (3/5) sont de taille plus hétérogène (de graviers à pierres). La couleur se situe entre le brun violacé d'avant et le brun jaune d'en dessous (10 YR 5/8). La texture argilo-limoneuse rend la structure un peu moins visible et un peu plus massive, cependant elle est encore sub-polyédrique.
- BPs (27-76 cm)(8.4) : la teinte est brun jaune. La texture est argileuse et la structure se compose de petits agrégats non polyédriques. Il n'y a presque plus de silex (1/5) et ceux qui restent sont de la classe des pierres.
- (II) β (76-77 cm) : même remarque que pour le sol 7.
- (II)Rca(77-... cm) : même remarque que pour le sol 7.

A nouveau l'ensemble des *ratios* proposés convergent vers un PODZOSOL mais peu évolué. En effet, le rapport Fe_{ox}/Fe_{CBD} varie entre 0.8 et 0.4 pour les horizons BPh/BPhBPs/BPs. Pour Bartolome (1990), il s'agit d'un PODZOSOL ou un Brun podzolique (nomenclature CPCS), ce qui concorde aussi avec la description de terrain où l'horizon E n'est pas très visible. La migration de Al_{pyro} est plus marquée que celle de Fe_{pyro} , ce qui concorde

aussi avec des processus moins marqués que dans le sol 7.

5.6.8 Sol 9 (BRUNISOL OLIGOSATURÉ) :

Le profil se trouve toujours dans la forêt sur silex mais en marge et donc l'épaisseur de ces derniers est plus faible. La séquence A/AS/S/IICsi/(II) β /(II)Rca rattache le profil au groupe de référence des BRUNISOLS et, plus précisément, OLIGOSATURÉ.

- A (0-6 cm)(9.1) : cet horizon présente une texture limoneuse fine et une structure grumeleuse. Le squelette est composé de cailloux de silex d'abondance 2/5. Il est acide, le pH H_2O mesuré est de 3.9. Le rapport C/N vaut 12.3 et confirme l'impression générale de bonne activité biologique observée lors de la description du profil. Le rapport S/T est faible (10%).
- AS (6-31 cm)(9.2) : la transition n'est pas très nette entre l'horizon A et le S. Un horizon de transition est choisi pour montrer cette limite diffuse. La structure reste grumeleuse mais des polyèdres mal définis sont présents. Le squelette comporte cette fois aussi des éléments de plus grande taille. La couleur est plus brun jaune que précédemment. Le pH remonte un peu mais reste plutôt acide (4.4). Le taux de saturation est très faible (17%).
- S (31-47 cm)(9.3) : cet horizon comporte une structure clairement polyédrique. La présence dans le squelette de blocs calcaires fait remonter le pH H_2O à 6.6. La couleur est de même teinte qu'auparavant. Le complexe argilo-humique est presque saturé (88%).
- IICsi (47-71 cm) : cet horizon est formé de silex anguleux de différentes tailles composant une sorte de puzzle compact. Une matrice argileuse remplit les fentes, collaborant ainsi à la cohésion des silex.
- (II) β (71-72 cm) : même remarque que pour le sol 7.
- (II)Rca (72-... cm) : même remarque que pour le sol 7.

Pas si simple que ça

Du point de vue descriptif, ce sol ressemble effectivement à un BRUNISOL. Il semble cependant que ce soit plus compliqué du point de vue analytique. Le fer extrait par solution de pyrophosphate est très élevé pour l'horizon AS (9.2). Malheureusement, une extraction au tétraborate n'était pas possible. Cette dernière aurait pu nous informer sur la mobilité des chélats organo-métalliques (Boudot & Bruckert, 1978). Le rapport Fe_{ox}/Fe_{CBD} est proche de 0.5 pour les horizons AS et S (9.2 et 9.3), ce qui les place dans la catégorie des PODZOSOLS. Les rapports Fe_{pyro}/Fe_{ox} et Fe_{pyro}/Fe_{CBD} convergent, eux

aussi, plutôt vers les PODZOSOLS. Dès lors, il est obligatoire de réfléchir sur les valeurs proposées et de les adapter peut-être à la situation du site d'étude⁷.

Le nom

En regardant différents résultats des analyses en laboratoire, une discontinuité très nette est visible. L'horizon S est très divergent du AS. Le rapport S/T augmente d'un facteur de sept et le pH fait un bond vers des valeurs neutres. Il est envisageable de voir un sol multiple comme l'a décrit Havlicek (1999) avec ses BRUNISOLS sur CALCOSOL. Cependant ici, l'horizon S est décarbonaté mais saturé. Le sol serait un BRUNISOL sur CALCISOL, ce qui en ferait une nouvelle référence! La granulométrie fait penser que le S s'est développé dans des loess mais la présence de cailloux calcaires rend cet horizon calcique. L'apport en Ca^{2+} est secondaire si les apports allochtones étaient non carbonatés. La question est de savoir si la carbonatation est plus rapide que la perte en carbonates, ce qui amènerait le sol vers la référence d'Havlicek. Cependant, la dalle de silex empêche les sources de calcaire de revenir dans l'horizon S. Il faut donc envisager qu'à long terme, ce sol se désature complètement et devienne un PODZOSOL OCRIQUE. Une autre remarque peut être faite sur le nom de ce sol. En effet, selon le *Référentiel pédologique* (AFES, 1995), c'est l'horizon S qui informe sur la saturation; or cet horizon a un taux de 88% et est donc saturé. Cependant, nous avons vu que l'horizon ne fait pas vraiment partie du BRUNISOL. Nous gardons donc oligosaturé pour les trente premiers centimètres de ce sol. Une prospection plus précise serait intéressante pour voir si d'autres profils obtiennent cette caractéristique.

5.6.9 Sol 4 (BRUNISOL SATURÉ) :

Ce sol est un peu en marge des autres du point de vue géographique. Il est creusé dans le pâturage entre la Métairie du Milieu de Bienne et la forêt sur silex. Il est dans une faible pente (<5%). Des silex jonchent la surface. Le taux de saturation se situe autour de 80% pour l'ensemble du sol. Le profil est décrit selon la séquence A/S1/S2/(II) β 1/(II) β 2/(II)Rca.

- A (0-10 cm)(4.1) : la texture de cet horizon est limono-argileuse et la structure grumeleuse est façonnée par le grand nombre de vers de terre. Le squelette est composé de quelques cailloux de silex (2/5). Le sol fin est acide car le pH H_2O vaut 5.2. Le fonctionnement biologique est bon avec un rapport C/N de 8.3. La couleur générale est brune (10 YR 4/4).

⁷ce sujet sera traité dans le prochain sous-chapitre

- S1 (10-25 cm)(4.2) : la transition est assez nette. La teinte change pour devenir brun jaune (10 YR 5/6). Quelques taches d'oxydation sont visibles çà et là dans l'horizon. La texture reste limono-argileuse mais la structure devient clairement polyédrique. L'activité biologique reste encore très bonne (C/N de 8.4) et la quantité de vers de terre et de racines est élevée (3/5 d'abondance pour ces dernières).
- S2 (25-50 cm)(4.3) : cette fois-ci la limite est plutôt diffuse. La structure évolue pour devenir sub-polyédrique. Les polyèdres ne sont pas très stables et se délitent facilement. Par contre, la texture reste identique. Le squelette est un mélange de silex et de calcaires pour une abondance de 3/5.
- (II) β 1 (50-65 cm)(4.4) : la texture de cet horizon est beaucoup plus maléable et elle contient plus d'argile (texture argileuse). La structure est relativement identique à celle de l'horizon supérieur. Malgré l'abondance de blocs calcaires, le pH reste acide et vaut 5.6 (pH H_2O). La teinte se situe toujours dans le brun jaune (10 YR 5/6).
- (II) β 2 (65-66 cm) : même remarque que pour le sol 7.
- (II)Rca (66-... cm) : même remarque que pour le sol 7.

Le point de repère

Ce profil est le seul ouvert sur la Dalle nacrée en dehors de la forêt sur silex. Une référence peut donc en être tirée pour essayer de comprendre les sols 6, 7, 8 et 9. Du point de vue descriptif, il ne peut pas s'agir d'un PODZOSOL. Il n'y a pas de E visible ni d'horizon BP. L'accumulation d'argile du (II) β 1 n'est pas un phénomène d'illuviation, car aucune argilane n'est observée. En regardant les différents rapports entre les formes de fer, les horizons S1 et S2 doivent être reliés à des PODZOSOLS ($Fe_{ox}/Fe_{CBD} > 0.5$). Nous retrouvons la même problématique que dans le sol 9 concernant les *ratios* de fer.

5.6.10 Sol 11 (BRUNISOL SATURÉ) :

Ce sol est décrit dans une tranchée creusée dans un pâturage au nord de la forêt à silex. La tranchée a pour but de voir la transition entre les argiles de l'Oxfordien et les calcaires durs du Birmenstorfer. Le profil se situe dans la partie la plus proche de la forêt à silex. La séquence est A/S/Mm. L'ensemble du solum est relativement compacté à cause du piétinement des bovins.

- A (0-10 cm)(11.1) : il est de couleur brune (2.5 Y 5/3). La texture est limono-argileuse fine et la structure grumeleuse. L'abondance de racines

- fines est élevée (4/5). Le pH H_2O est mesuré à 5.6 malgré la présence de pierres calcaires (2/5). L'activité biologique est bonne (C/N de 10).
- S (10-22 cm)(11.2) : la compaction du sol rend la transition peu claire. La structure polyédrique est tout de même visible. La texture reste identique. Le pH H_2O remonte légèrement et atteint 5.9. La CEC est bonne (95%)
 - Mm (22-... cm) c'est un substrat géologique meuble, carbonaté (HCl 4/4), de couleur beige. Il n'est pas répertorié par Aufranc (1985).

Pourquoi si acide ?

C'est un sol "classique". La seule et unique question est de savoir pourquoi ce sol est acide alors qu'un CALCOSOL (sol 10) se trouve à quelques mètres seulement et que le substrat géologique est le même. Deux hypothèses sont envisagées :

- la première postule que le sol ne s'est pas formé à partir du substrat marneux mais des loess. Malheureusement, il est impossible de vérifier cette proposition car aucune analyse minéralogique n'est faite sur ce sol. Il faudrait dès lors renommer l'horizon Mm en IIMm.
- la seconde explication peut venir du fait qu'il y a une plus grande teneur en squelette carbonaté dans le CALCOSOL. Ce dernier contribue à conserver un sol jeune du point de vue des processus. Le BRUNISOL SATURÉ est donc passé par des stades carbonatés et structurés que sont les CALCOSOLS et les CALCISOLS pour arriver à une phase décalcifiée. D'après le *Référentiel pédologique*, le S ne peut pas être un Sci car son pH est trop bas. Il ne peut donc pas être nommé CALCISOL.

5.6.11 Sol 10 (CALCOSOL) :

Le profil évolue dans le même environnement que le sol 11 mais se situe plus proche des calcaires durs. Il est décrit comme un CALCOSOL avec les horizons Aca/Sca/Mm.

- Aca (0-6 cm)(10.1) : c'est le premier sol avec un horizon de surface carbonaté. Il fait effervescence au test HCl (2/4) et son pH H_2O vaut 7.2. Sa texture est limono-argileuse fine et la structure grumeleuse. Il y a beaucoup de racines fines (3/5). Le rapport C/N vaut 10.2, prouvant la bonne activité biologique de l'horizon. Le squelette est composé de pierres calcaires moyennement abondantes (2/5). Il y a quelques charbons.
- Sca (6-17 cm)(10.2) : la structure change légèrement de l'horizon de surface. On y voit des petits polyèdres. Pour le reste, il est en tout

- point identique à l'horizon A
- Mm (17-... cm) : c'est le même substrat géologique que le sol 11.

Pas si courant que ça

C'est un des seuls solums entièrement carbonatés creusés dans la zone d'étude. Il est influencé non seulement par des marnes mais aussi par quelques pierres colluvionnées provenant des calcaires du Birmenstorfer.

5.6.12 Sol 12 (ORGANOSOL CALCAIRE ou LITHOSOL) :

Toujours dans la tranchée, le profil est creusé au milieu de blocs calcaires qui reposent sur le substrat géologique décrit pour le sol 11. Il est composé d'un seul horizon Acah de 12 centimètres. Il est donc possible de le ranger dans deux catégories, les LITHOSOLS, si on prend en compte une certaine tolérance d'épaisseur, ou les RENDOSOLS.

- Acah (0-12 cm)(12.1) : c'est un horizon noir (2.5 Y 3/2) avec un rapport C/N très élevé (36.3) qui dénote une mauvaise activité biologique, et ce malgré la présence de vers de terre et de racines. C'est le fort taux de carbone organique (23.7%), qui place, en fait, ce sol dans les ORGANOSOLS CALCAIRES. La texture est limoneuse très fine et la structure grumeleuse.
- Rca (12-... cm) : les blocs calcaires durs font partie de la couche stratigraphique du Birmenstorfer.

Le nom est à choix. L'avantage de la désignation d'ORGANOSOL CALCAIRE, c'est qu'elle est plus précise que le LITHOSOL. Il traduit le fait qu'il y ait beaucoup de matière organique (23%) et qu'il soit carbonaté. LITHOSOL n'informe que sur la faible épaisseur du profil (12 cm).

5.6.13 Sol 16 (ORGANOSOL CALCIQUE) :

Ce profil est creusé pendant une seconde phase de terrain durant le printemps 2007, au même titre que le 14 et le 15. Ces sols n'ont pas subi toutes les analyses classiques mais uniquement celles qui permettent de les caractériser. Il s'est développé sur la couche géologique du Birmenstorfer qui est un calcaire dur. Ce dernier forme un lapié exposé nord. Le solum est composé de trois horizons (OF/Ah/Rca) et appartient au GER des ORGANOSOLS.

- OF (0-5 cm) : il est composé de débris de résineux et de racines de *Polytrichum formosum*. Le pH Hellige vaut 4.

- Ah (5-12 cm)(16.1) : son pH H_2O vaut 5.1. Au toucher, sa texture est limoneuse et sa structure grumeleuse. Il n'y a pas de squelette minéral mais quelques racines le parcourent (2/5 de taille moyenne à fine). Son taux de matière organique est de 24.8% d'après la perte au feu.
- Rca (12-.. cm) : calcaires du Birmenstorfer.

Ce type de sol est déjà décrit par Bruckert & Gaiffe (1980). La roche très compacte ne libère que peu de résidu silicaté qui est rapidement évacué par les eaux de ruissellement. Par ce fait, la profondeur du sol est limitée. Les mousses et les aiguilles de conifères sont à l'origine d'une petite accumulation d'une dizaine de centimètres de matière organique qui confère au sol les caractéristiques de l'ORGANOSOL.

5.6.14 Sol 5 (ANTHROPOSOL ARTIFICIEL - LUVISOL - RÉDOXISOL) :

Il se trouve dans le talweg nord. Il n'y a pas de système de dolines dans ce dernier, si ce n'est plus à l'ouest. Le talweg fait partie d'un pâturage avec la végétation qui s'y rattache⁸. La séquence le caractérisant est la suivante : A1/A2/E/BTg/BT/(II)Mm. La présence d'une grande quantité de charbons le rend atypique et aucun rattachement aux GER n'est possible (AFES, 1995). Il faut créer un triple rattachement : ANTHROPOSOL-LUVISOL-REDOXISOL. La *World Reference Base* (WRB, 2006) propose un anthric LUVISOL-STAGNOSOL. Chacune de ces classifications montre le rôle de l'homme mais n'évoque pas les charbons. L'ensemble du profil a un pH H_2O entre 5 et 5.5.

- A1 (0-11 cm)(5.1) : cet horizon est dominé par les charbons. Ils constituent une grande partie de ce dernier. De ce fait, c'est la teinte noire qui l'emporte (N 1.5/0). L'activité biologique semble bonne car de nombreux vers de terre et racines le parcourent. Cependant le rapport C/N est haut (30.5) avec un taux de carbone organique de 17%. La terre fine présente une texture limoneuse fine et une structure grumeleuse.
- A2 (11-24 cm)(5.2) : c'est ici que la quantité de charbon est la plus importante. Il y a très peu de terre mais sa texture reste limoneuse fine. On devine une légère structure grumeleuse et particulaire. Le rapport C/N reste très élevé (34.2). On n'y trouve aucun squelette.
- E (24-34 cm)(5.3) : la transition avec l'horizon supérieur est nette car la quantité de charbon diminue drastiquement. La teinte est grise (2.5 Y 4/2) et une bande horizontale de charbon coupe l'horizon en deux.

⁸chapitre 6.

La structure est assez massive et la porosité mauvaise. La texture reste limoneuse fine.

- BTg (34-87 cm)(5.4) : le changement de teinte est immédiat (10 YR 7/6). La couleur devient orangée avec des petites taches grises et des zones plus noires qui semblent suivre d'anciennes galeries racinaires ou des fissures. La structure reste très massive et la porosité est toujours mauvaise. La texture est limoneuse fine argileuse. Il n'y a toujours pas d'éléments de squelette.
- BT (87-95 cm)(5.5) : la limite n'est pas évidente à voir. La couleur est jaunâtre (2.5 Y 7/6). La texture est limono-argileuse fine et la structure reste la même.
- (II)Mm (95-... cm) : c'est une couche de marnes de L'Argovien. Elle est carbonatée (*HCl* 4/4) et de couleur beige. Des cailloux calcaires s'y trouvent.

Très (trop ?) compliqué !

Sa situation et son passé confèrent à ce sol des qualités particulières. L'exploitation et la fabrication de charbon dans certains points bas de Chasseral, notamment dans le talweg nord de la zone d'étude, rend le profil anthropique par une accumulation de charbons en surface⁹. La présence de l'horizon E puis l'augmentation en argile dans les horizons sous-jacents laissent à penser qu'il y a de l'illuviation. Finalement, les taches rouille accompagnées de zones décolorées dans le BT(5.4) dénotent la présence d'une nappe d'eau non permanente qui crée des conditions rédoxiques. Son évolution est probablement encore plus compliquée que cela. Le ruissellement diffus a apporté des matériaux des versants voisins. Le lessivage latéral est, lui aussi, intense mais il est difficile de le prouver. Bref, ce sol mériterait beaucoup plus d'analyses pour mieux le comprendre. Une simplification nominale peut tout de même être apportée. Nous pouvons voir ce sol comme un LUVISOL - ANTHROPOSOL ARTIFICIEL rédoxique.

5.6.15 Sol 15 (BRUNISOL SATURÉ - RÉDOXISOL) :

Il représente l'ensemble des sols qui se développent sur les marnes de l'Argovien exposées au sud¹⁰. La pente est d'environ 10%. La végétation est quasiment la même que celle qui est décrit dans le chapitre 6 correspondant à un pâturage. La séquence est décrite comme A/S/g/Mm, ce qui place ce profil dans les BRUNISOLS OLIGOSATURÉS - REDUCTISOLS.

⁹voir l'historique, chapitre 1.

¹⁰voir la carte des sols.

- A (0-6 cm) : sur le terrain, il est décrit comme limoneux et possède une structure grumeleuse. Il y a des racines fines (3/5). Le pH Hellige vaut 5.
- S (6-14)(15.1) : il est toujours limoneux mais sa structure devient polyédrique. Le pH H_2O est de 5.2. La CEC mesurée à l'aide de la méthode TP (Gobat, 2006) est peu saturé (43%). Il y a moins de racines (2/5) et elles sont de taille moyenne.
- g (14-29 cm) : cet horizon présente des taches d'oxydo-réduction. Sa texture décrite par le toucher est argilo-limoneuse et sa structure est massive et plastique. Il y a quelques charbons de petite taille. Les racines ne parviennent plus à cette profondeur.
- Mm (29-... cm) : il s'agit des marnes de l'Argovien, elles sont fortement carbonatées.

C'est le sol typique des pâturages de Chasseral exposés plein sud. Pochon (1973) suppose que, sur les marnes de l'Argovien, les loess se sont déposés de manière préférentielle car la pente est plus faible que sur les calcaires durs. Ici, ça ne semble pas être le cas, la terre fine est issue de l'altération des marnes. Malheureusement, aucune analyse minéralogique ne vient confirmer cette hypothèse.

5.6.16 Sol 14 (BRUNISOL SATURÉ) :

Ce sol est le plus haut du site d'étude. Il culmine à une altitude proche de 1400 m. Sa roche substrat ressemblant à une marne ne figure pas sur la carte géologique. C'est un BRUNISOL SATURÉ classique de type Aca/AS/S/Mm.

- Aca (0-8 cm) : cet horizon est légèrement carbonaté (1/4) et son pH Hellige vaut 6.5. Il est de structure grumeleuse et de texture limoneuse. Les racines vont des classes fines à grossières pour une abondance de 3/5.
- AS (8-20 cm) : la structure devient un peu plus polyédrique tout en gardant une part grumeleuse. Le pH descend jusqu'à 5 selon le pH Hellige et la terre fine ne réagit plus à HCl . Les grosses racines sont nombreuses.
- S (20-42 cm)(14.1) : cette fois la structure grumeleuse laisse complètement la place à un type polyédrique. Il y a moins de racines (2/5) et elles sont de plus petite taille. Le pH reste constant.
- Mm (42-... cm) : c'est un substrat meuble, fortement carbonaté, avec quelques cailloux calcaires.

Le but de l'ouverture de ce profil est de voir si ce sont bien des marnes qui sont présentes sur la crête nord, car la carte géologique n'en recense pas. La description du profil le place dans les BRUNISOLS et la CEC précise qu'il est SATURÉ. Le substrat est bien des marnes. La présence d'un horizon carbonaté en surface est étonnante. La seule explication possible, c'est que des carbonates ont ruiselé des roches affleurantes situées juste en dessus du profil. Cette carbonatation est secondaire.

5.7 Discussion

Le but de ce sous-chapitre est d'approfondir les descriptions et de discuter des différents résultats.

Y a-t'il une discontinuité lithologique ?

Une petite réflexion sur l'origine du substrat du sol doit se faire et plus précisément sur la couche géologique appelée Dalle nacrée. Pour rappel, c'est un calcaire dur, mais moins pur que les calcaires blancs du Jura formés par exemple au Kimméridgien ou au Porthlandien. Son résidu silicaté après altération représente environ 8% (Bouyer *et al.*, 1978). La couche édaphique développée en dessus de cette roche du Callovien possède des silex en son sein. Nous savons que les silex proviennent exclusivement de cette strate géologique (Kühni, n.d.). Ainsi, une partie de la terre fine doit provenir du résidu d'insolubilisation de la roche. Les analyses aux RX semblent confirmer cette hypothèse. Il ne faut tout de même pas exclure un apport allochtone sous forme de loess. Un phénomène extrême a pu se dérouler. Cependant, il semble peu vraisemblable : le résidu d'altération est complètement ruiselé, il ne reste que les silex. Les vents apportent des loess et le gel permet aux biefs à silex de remonter dans la couche de limons fraîchement déposée (Verrecchia, 2006). Ceci peut expliquer la présence de silex dans l'ensemble des horizons. Cette hypothèse paraît devoir être rejetée. C'est pourquoi le II du IIRca (voir II(I)Rca) est noté avec des parenthèses. Il est impossible d'exclure que le sol se développe dans un résidu d'altération surtout après avoir regardé les différents résultats obtenus par l'analyse aux rayons X. Ils montrent, par exemple dans le sol 7, la présence d'argiles d'altération¹¹. Une autre solution est de minimiser le rôle de la Dalle nacrée selon le type d'évolution du sol. Il est inenvisageable qu'un PODZOSOL se développe dans un résidu d'altération calcaire en 15'000 ans. Pour ce genre de pédogenèse acide, il faut mettre

¹¹voir le chapitre sur les formations superficielles, chapitre 4.

IIRca. Cependant, il est impossible de négliger le rôle du Ca^{2+} dans les dix à vingt derniers centimètres des profils. Les parenthèses sont donc gardées.

Que vaut la hauteur d'accumulation du résidu d'insolubilisation de la Dalle nacrée en 17'000 environ? La Dalle nacrée contient environ 8% de RI. D'après Bouyer *et al.* (1978), l'altération progresse de 0.1 mm par an, ce qui fait environ 14 cm.

Comparaison temporelle

Faisons une comparaison entre le BRUNISOL SATURÉ de référence (sol 4) et le sol polyphasé (sol 6). Il est intéressant de remarquer que le taux de Fe_{pyro} de (II) β 1 du sol 4 est bien plus grand que celui du sol 6 pour le même horizon. Deux explications sont possibles : la première est que le 4.4 ((II) β 1) ne se situe qu'à une cinquantaine de centimètres de l'horizon de surface alors que pour le 6.6 (II(I) β 1), il y a plus d'un mètre trente (attention, avec la couche de silex il faut mettre une tolérance de 50 cm environ car il n'y a pas de vraie pédogenèse actuellement dans l'horizon EXp). Ainsi, les complexes organométalliques tout de même légèrement formés dans le sol 4 ont pu migrer jusqu'au fond du profil durant la période de pédogenèse, alors que le temps était trop court pour arriver au même résultat dans le sol 6. La seconde hypothèse est que le (II) β 1 du sol 4 est beaucoup plus acide que son homologue du sol 6. Le pH étant plus élevé dans ce dernier, les chélats sont bloqués plus en amont dans le profil. A la suite de cette observation, il est intéressant d'essayer de trouver un horizon correspondant au 4.4.

Dans le PODZOSOL OCRIQUE sur BRUNISOL OLIGOSATURÉ, c'est entre les horizons 6.4 et 6.5 que le pH vaut environ 5.6 (pH du 4.4¹²). Pour ce qui est de la distance à la surface, c'est un peu trop profond (environ 120 cm) mais avec la tolérance de la couche de silex, nous obtenons 70 cm. Il est possible de dire que la correspondance selon le pH et la profondeur est correcte. Cependant, le Fe_{pyro} est tout de même deux fois plus faible dans le sol 6. Par contre l' Al_{pyro} est comparable alors qu'il ne l'est pas du tout dans les β 1 correspondants. Sachant que l'aluminium migre plus vite que le fer (Duchaufour, 1983), il est possible que la durée de pédogenèse ne soit pas identique pour les deux sols. Par logique, le sol 4 s'est développé pendant plus longtemps que le sol 6 car le fer a migré plus profondément.

La période du Dryas III permet la mise en place des silex et influence le sol 6 mais ne stoppe pas complètement la pédogenèse du BRUNISOL SATURÉ, ce qui peut être confirmé par les loess. Ces derniers étant stables après avoir subi des processus édaphiques, leur présence démontre la stabilité du terrain.

¹²on part du principe que le pH, par exemple, évolue de la même manière si le substrat et les conditions environnementales sont les mêmes.

Le sol 4 est donc resté en place depuis la sortie du Würm et la poche originelle de silex se situe entre ces deux profils, soit non loin de la frontière communale entre Courtelary et Cortébert, à la lisière de la forêt, à une cinquantaine de mètres du sol 6.

Le fer et ses rapports

Parlons un peu des différents *ratios* proposés dans la littérature et qui ne semblent pas toujours être cohérents avec les descriptions présentées dans ce travail. En préambule, voici quelques remarques tirées de la littérature :

- Les PODZOSOLS des climats tempérés peuvent se développer en 3000 ans mais ne présentent pas alors d’horizons E. Les sols étudiés sur des moraines de 5000 ans possèdent tous un E marqué (Legros, 2007).
- Souchier (1984) propose que les horizons spodiques d’évolution avancée peuvent avoir une charge en fer cristallisé relativement importante, ce qui rabaisse le rapport Fe_{ox}/Fe_{CBD} .
- A l’opposé, une extraction à l’oxalate a pour effet de solubiliser les allophanes alors que la solution de CBD ne les attaque pas. Ainsi, le ratio Fe_{ox}/Fe_{CBD} augmente (Souchier, 1984).
- La présence de carbonate et de calcium a tendance à ralentir la pédogenèse en direction des sols acides (Pedro, 1972).

A partir de là, reprenons chaque sol où le fer est analysé :

- Le sol 1 et le sol 13 sont comparables. Leurs Fe_{ox}/Fe_{CBD} obtiennent une valeur supérieure à 0.5 pour les horizons présentant peu ou pas d’oxydo-réduction (1.4, 13.2, 13.3). Ils doivent être présentés comme appartenant à des PODZOSOLS (Bartolome, 1990). Les horizons à caractères hydromorphes voient ce rapport chuter, car le fer des formes amorphes (Fe_{ox}) est en partie réductible par l’eau et peut sortir du solum. Pour ce qui est de Fe_{pyro}/Fe_{CBD} , il est dans tous les cas supérieur à 0.2 et converge donc vers les PODZOSOLS. Ceci peut paraître étonnant car les chélats organo-minéraux sont solubles dans l’eau et devraient donc être évacués du profil. Apparemment, même si ce ratio diminue avec la profondeur et l’augmentation du battement de nappe, il est insuffisant pour supprimer le caractère spodique.
- Le sol 6 est déjà en partie traité dans le paragraphe lui étant consacré. Il faut rajouter que le rapport Fe_{ox}/Fe_{CBD} est toujours inférieur à 0.5. Comme le signale Vadi (1997), les valeurs proches mais en dessous de 0.5 décrivent les anciens Bruns ocreux et Ocres podzoliques. Cette vision est en accord avec la description et l’évolution probable de ce sol. Une pédogenèse stoppée par une arrivée de clastites de silex et un

ralentissement dû au calcium en font un PODZOSOL jeune. A l'inverse, il peut être vieux et la quantité de formes cristallisées de fer peut avoir augmenté avec le temps, mais la première hypothèse semble être plus cohérente.

- Il ne faut pas revenir sur les deux PODZOSOLS OCRIQUES (sols 7 et 8) car tous les détails sont discutés dans leur description respective.
- Le sol 9 est probablement le plus compliqué à comprendre. Pour rappel, il est décrit comme BRUNISOL OLIGOSATURÉ mais les analyses du fer le rapprochent des PODZOSOLS. Commençons par le ratio Fe_{ox}/Fe_{CBD} qui est légèrement supérieur à 0.5 pour les horizons AS et S. S'il s'agit effectivement de couches cambiques, il faut expliquer le fort taux de formes amorphes présent et répondre à la question suivante : pourquoi n'est-il pas comme les autres sols se développant sur la Dalle nacrée ? Pour commencer il est plus mince que les autres et présente des blocs calcaires dans l'horizon S. La valeur élevée en Fe_{ox} dans le AS peut provenir des allophanes issus de l'altération des argiles. Cette explication n'est pas valable pour le S car son pH H_2O est de 6.6 et les argiles sont stables proche de la neutralité. Il est possible que la Dalle nacrée contienne des formes amorphes de fer en relativement grande quantité. Elles sont relâchées lorsque celle-ci s'altère. Ces formes amorphes peuvent recomposer des réseaux mieux cristallisés, par exemple sous forme de goéthite et de lépidocrocite. Le rapport Fe_{pyro}/Fe_{CBD} est lui aussi fortement supérieur aux valeurs données aux BRUNISOLS. Or nous venons de voir qu'en proportion, il y a peu de Fe_{CBD} . Ensuite, le Fe_{pyro} détermine la quantité de chélats organométalliques immobiles et mobiles. Le fort taux de Fe_{pyro}/Fe_{CBD} ne décrit pas de la podzolisation mais uniquement une présence importante de ces complexes sans que ceux-ci aient forcément migré. Cette remarque n'est pas valable dans les autres profils. Dans quatre PODZOSOLS sur cinq, un horizon E est présent, ce qui atteste de la migration des différents acteurs de la podzolisation. Seul le PODZOSOL OCRIQUE du sol 8 peut être contesté, mais la description diverge des BRUNISOLS notamment par l'absence d'un horizon S marqué.
- Le sol 4 se comporte un peu de la même façon que sol 9 en ce qui concerne les horizons S.
- Le rapport Fe_{ox}/Fe_{CBD} du sol 11 se comporte de la même manière que celui du sol 9.
- Pour finir le sol 5 qui, lui aussi, présente des rapports proches de ceux des PODZOSOLS. Si les formes amorphes sont en relativement grandes quantités par rapport aux formes cristallisées, la raison peut provenir de la dégradation des argiles des horizons Eh et BTg. Pour ce qui est

du taux élevé de Fe_{pyro} , le rôle des charbons reste flou. Quel est leur comportement face aux divers ions métalliques ? Cette question reste sans réponse.

Analyses statistiques de différents éléments minéralogiques

La FRX donne des résultats intéressants. Après traitement mathématique (ACP) (FIG. 5.5 et FIG. 5.6) et un regroupement en cinq groupes, nous pouvons voir certaines analogies ou divergences. Tout d'abord l'horizon 6.6 est différent par la présence de Ca^{2+} en grande quantité. Le 11.2 suit cette tendance. Ensuite, le groupe UQCAM représente le standard de la FRX. Le rassemblement rouge se fait par un critère prépondérant : un fort taux de Fe^{3+} et Al^{3+} . Dans tous les cas, il s'agit d'horizons d'accumulation (B) ou de structuration (S). Enfin, le dernier groupe rallie les horizons à perte. La concentration en silice a tendance à être élevée et les éléments métalliques précédents sont peu présents. Ce sont les horizons E et g sauf pour les horizons 8.2 et 8.3. Leur présence dans ce groupe tient à la concentration en TiO_2 . Cet élément est normalement lié au calcaire mais par ce traitement mathématique, il est anticorrélé à CaO . Il peut aussi provenir de poussières atmosphériques, mais pourquoi est-il plus marqué au sein de ce sol en particulier ? Aucune solution envisagée ne répond à cette question de façon satisfaisante. Cependant, le fait le plus marquant de cette analyse statistique est probablement la relation entre les substrats et les éléments de la pédogenèse. En effet, si nous relierons les deux grands types de substrat décrits par Ca^{2+} et par SiO_2 , nous pouvons remarquer que Fe et Al se situent perpendiculairement à la droite créée. Cette constatation appuie les théories de l'évolution des sols par un phénomène de brunification qu'importe le substrat.

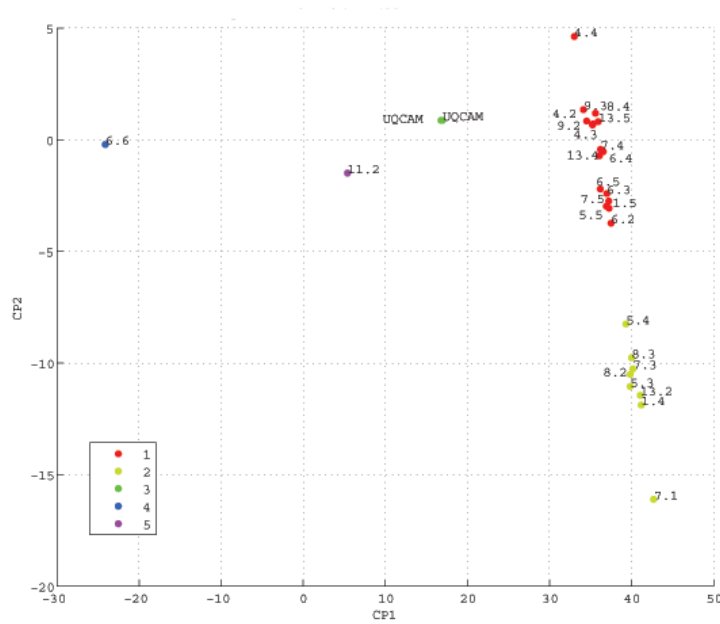


FIG. 5.5 – Projection des échantillons sur CP1 et CP2 selon 5 groupes.

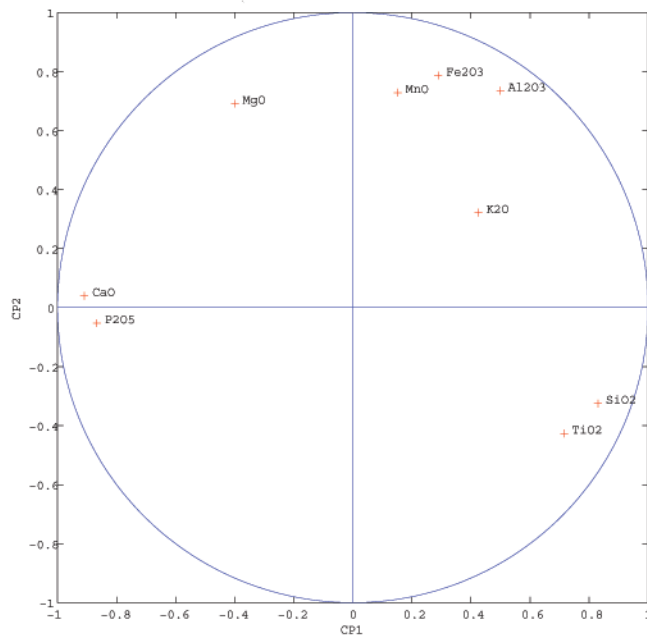


FIG. 5.6 – Cercle de corrélation selon CP1 et CP2.

Est-ce que la podzolisation dans le Jura est une vue de l'esprit ?

Affirmer qu'il y a de la podzolisation dans le Jura n'est pas avant-gardiste, mais il est intéressant de comprendre pourquoi ce processus s'observe dans la zone d'étude. Dans tous les cas, la végétation est composée essentiellement de *Picea abies*, *Vaccinium myrtillus* et *Polytrichum formosum*, qui fournissent une litière acidifiante. La pluviométrie est plus forte que l'évapotranspiration, empêchant ainsi la remontée dans le profil d'éléments comme le Ca^{2+} . La texture est pauvre en argile, ce qui permet un bon drainage vertical, bien que la charge en limons fins soit grande (jusqu'à 43% du total). Chaque PODZOSOL a sa "couche" isolante du substrat calcaire. Dans le cas des sols 1 et 13, il s'agit d'une épaisseur de résidu d'altération des marnes probablement déjà décarbonaté avant la mise en mouvement ainsi que de loess. Pour le PODZOSOL OCRIQUE sur BRUNISOL OLIGOSATURE, c'est la présence de silex sous forme de clastites qui crée cet isolement. Le sol 7 possède, quant à lui, une dalle de silex compacte qui empêche une bioturbation des horizons carbonatés sous-jacents. Pour finir, nous avons vu que le sol 8 est un PODZOSOL OCRIQUE mais très peu évolué. Il ne possède pas une "cloison" étanche avec le calcaire mais il est cependant très pauvre en ions Ca^{2+} pouvant inhiber la podzolisation. En regardant la granulométrie de ce sol, nous constatons que le pourcentage d'argile est élevé dans les horizons BPhBPs et BPs. Malgré une faible pente (<5%), il est envisageable que le lessivage latéral puisse évacuer le Ca^{2+} . Dans chacun de ces cas, c'est l'eau de pluie qui participe à la pédogenèse et non de l'eau de ruissellement.

Pas si classique

Du point de vue pédologique, il est intéressant de comparer ces résultats avec quelques études menées ces dernières décennies dans le massif jurassien. Havlicek (1999) a décrit quatorze types de sol. Seuls cinq sont communs. Il s'agit du BRUNISOL OLIGOSTURÉ, du RÉDOXISOL, du LITHOSOL, du CALCOSOL et de l'ORGANOSOL CALCAIRE. Ils présentent *grosso modo* les mêmes caractéristiques dans les deux études. Les sols les plus fréquemment trouvés dans le travail d'Havlicek sont les NÉOLUVISOLS, les BRUNISOLS, les CALCOSOLS et enfin les BRUNISOLS sur CALCOSOL. Les premiers n'ont pas été identifiés sur le site de Chasseral. Ils sont décrits comme ayant un pH acide entre 4 et 5 or tous les BRUNISOLS pouvant subir un lessivage ont un pH supérieur à 5. A en croire les analyses du sol 9, il semble que dans la forêt à silex les BRUNISOLS évoluent vers des PODZOSOLS plutôt que vers les NÉOLUVISOLS. Alors que les CALCOSOLS sont courants pour Havlicek, ils ne sont pas nombreux vers la Métairie du Milieu de Bienne. La principale raison vient du

fait qu'il y a très peu de colluvions calcaires. Enfin le dernier type est totalement absent, la fragmentation des roches étant apparemment insuffisante. Vadi (1997) a étudié les PODZOSOLS du Jura. Après comparaison, aucun lien n'est vraiment trouvé avec son travail. A Chasseral, tous les PODZOSOLS sur silex présentent un horizon BPh, ce qui ne semble pas être courant ailleurs. De plus, Vadi décrit un horizon BT dans presque tous ses profils, alors qu'il n'y en a pas dans l'étude présente. Une seule analogie peut être tirée avec le PODZOSOL MEUBLE bathyluvique du Bois-Raiguel. Nous allons encore nous intéresser à deux thèses effectuées durant les années quatre-vingt. Elles sont écrites par Michalet (1982) et Gaiffe (1987). Tout comme pour Havlicek, il faut supprimer tous les sols se développant dans des grèzes ou sur des dalles fortement diaclasées. Par ce tri, un bon nombre de solums sont écartés. Il ne reste en commun que les sols lithocalciques sur lapiés ! Le tableau suivant (TAB. 5.1) reprend l'ensemble des sols des quatre travaux présentés et résume les analogies ou les différences. Les noms sont donnés selon la nomenclature utilisée par l'auteur original.

TAB. 5.1 – Comparaison édaphique avec d'autres ouvrages décrivant les sols de l'étage montagnard et sub-alpin du Jura.

Nom	substrat	différences avec notre étude
ANTHROPOSOL TRANSFORMÉ	ancien sol	pas de travail de la terre
BRUNISOL	souvent du loess	aucunes mais se trouve aussi sur marnes
BRUNISOL SUR CALCOSOL	calcaires fragmentés	peu de diaclases
CALCOSOL	calcaires fragmentés	toujours lié à des colluvions carbonatées
LITHOSOL	calcaires durs - lapiés	aucunes
NÉOLUVISOL	loess	pas de pH suffisamment bas
ORGANOSOL CALCAIRE	Cca	aucunes
ORGANOSOL INSATURE	Rca	pas trouvé mais probablement présent
RÉDOXISOL	marnes	aucunes
RENDISOL OU RENDOSOL	Rca	trop de matière organique (>8%)
SOL HUMO-CALCIQUE	calcaires concassés	pas de roche concassée
SOL LITHO-CALCIQUE	calcaires durs - lapiés	correspond à l'ORGANOSOL CALCIQUE
SOL BRUN HUMIFÈRE À PEL-LICULES CALCAIRES	calcaires durs diaclasés plats	toujours en pente, mais ressemble au BRUNISOL OLIGOSATURÉ
SOL BRUN CALCIQUE	calcaires durs non diaclasés	les CALCOSOLS sont plutôt issus des marnes ou de colluvions

La situation topographique et historique de la zone d'étude rend la cou-

verture édaphique en partie différente du reste du Jura. Les glaciers étant absents de Chasseral, aucune moraine calcaire ne s'y trouve. Les dalles sont en position horizontale empêchant ainsi une importante formation de colluvions carbonatées, à l'exception des crêtes. Les pentes sont dominées par les marnes. Par l'ensemble de ces facteurs, un bon nombre de faciès de solums à pédogenèse carbonatée est exclu.

5.8 Conclusion & Perspectives

Le travail sur les sols de cette zone de Chasseral est relativement complet du point de vue typologique. Il décrit un paysage édaphique à la fois varié et atypique pour le Jura. Nous avons probablement oublié quelques types de sols comme les CALCISOLS dans les pentes avec colluvions calcaires ou encore des NÉOLUVISOLS issus des loess dans des petites dépressions. Les processus sont surtout abordés par les rapports entre les différentes extractions de fer et d'aluminium. Malheureusement, les résultats de la FRX ne sont pas beaucoup utilisés par manque de temps. Cependant, après une rapide observation, nous constatons qu'ils appuient les conclusions tirées dans ce travail. Des analyses plus systématiques dans tous les horizons font parfois défaut mais ne sont pas forcément déterminantes dans la compréhension globale. Les principales lacunes se situent au niveau des acides humiques et fulviques et des extractions de *Fe* et *Al*. Malgré tout, les objectifs sont tenus.

Par contre, il manque une étude de base en géologie pour connaître l'importance quantitative et qualitative des loess et des silex, ainsi que leur(s) rôle(s) dans la pédogenèse. Il serait intéressant de faire un trassage temporel, par exemple grâce à la matière organique, pour mieux dater les stades d'évolution de ces sols. De plus, un affranchissement géographique pour retourner aux lois générales de la pédogenèse aurait pu accompagner ce travail.

L'aboutissement de ce travail en pédologie est probablement l'acquisition d'une grande autonomie face à des problèmes de typologie édaphique et d'une mise à l'épreuve sur le terrain de la vision "biogéosciences".

Chapitre 6

Formes d'humus

6.1 Introduction

Ce chapitre fait un zoom sur la forêt à silex à travers les formes d'humus. Une approche plus fine permet d'aborder en détail le fonctionnement de cette zone bien précise.

L'étude des premiers centimètres d'un sol, plus particulièrement les horizons contenant de la matière organique (horizons holorganiques et hémiorganiques) et les horizons organo-minéraux, ou autrement dit l'épisolum humifère, peut révéler des informations intéressantes. L'étude des formes d'humus permet notamment de démontrer l'impact des silex sur la végétation.

Notons que "l'humus" au sens strict est défini d'après le *Référentiel pédologique* (AFES, 1995) comme "la fraction de la matière organique du sol transformée par voie biologique et chimique" et d'après le *Dictionnaire des sciences du sol* (Lozet & Mathieu, 2002) comme " l'ensemble des produits d'altération ou en voie d'altération de la matière organique du sol." Ce terme a donc un sens biochimique, c'est pourquoi il ne faut pas le confondre avec le terme "formes d'humus". Ce dernier englobe "l'ensemble des caractères morphologiques macroscopiques de l'épisolum humifère, dépendant de son mode de fonctionnement" (AFES, 1995).

Les formes d'humus occupent une place primordiale dans les écosystèmes forestiers. Comme l'a relevé Havlicek (1999), c'est là que le vivant et le minéral se rencontrent et que la matière organique est recyclée, situant ainsi ce système à part entière à l'interface entre la géosphère et la biosphère. De par sa situation entre le sol et la végétation et par son rôle intégrateur dépendant de l'activité biologique ainsi que des conditions environnementales (Jabiol *et al.*, n.d.), ce système réagit rapidement aux perturbations externes, qu'elles soient anthropiques ou naturelles. Il constitue ainsi une

charnière spatio-temporelle dans les écosystèmes (Havlicek & Gobat, 1998).

6.1.1 Etat de la recherche

Les formes d'humus sont étudiées depuis de nombreuses années. Les travaux de Muller (1889) décrivent déjà les grands principes de leur morphologie et de leur structure. Les mulls et les mors sont définis pour la première fois. Un peu plus tard, une troisième catégorie naît, les moders (Romell & Heiberg, 1931), regroupant des caractéristiques intermédiaires aux deux formes décrites jusqu'ici.

Les dénominations des horizons se mettent petit à petit en place, tout d'abord par distinction des horizons OL, OF et OH (Hesselmann, 1926) selon le degré de dégradation du matériau végétal, puis par des subdivisions plus fines OLn, OLv, OFr, OFm, OHr, OHf (Babel, 1970)¹.

L'accent est ensuite mis sur les caractéristiques macroscopiques et microscopiques des formes d'humus (Kubiena, 1943; Barratt, 1964), sur leur fonctionnement et leur évolution (Handley, 1954; Bernier & Ponge, 1993), notamment par le biais de la faune du sol (Bal, 1970; Bouché, 1974; Ponge, 1991; Sagot *et al.*, 1999; Chauvat *et al.*, 2007). Ainsi, comme l'a relevé Bernier (1992), d'une science purement descriptive, la macromorphologie des formes d'humus évolue progressivement vers une connaissance intégrée du fonctionnement des épisolums humifères.

Beaucoup d'études portent sur les formes d'humus forestières (Toutain, 1974, 1981; Ponge & Brun, n.d.; Bernier & Ponge, 1993; Brêthes *et al.*, 1995). En revanche, le fonctionnement des formes d'humus forestières jeunes sur substrat acide à l'étage subalpin, comme il est question dans ce travail, est très peu connu. Quelques relations peuvent être tirées des travaux sur les zones alluviales (Fierz & Guenat, 1995; Bullinger-Weber *et al.*, 2007) car il s'agit dans les deux cas d'humus "jeunes", mais les conditions du milieu sont différentes.

6.2 Objectifs

Les objectifs fixés se résument en deux volets.

- Le premier, basé sur le long terme (de l'ordre des décennies), a pour but l'établissement d'une typologie fonctionnelle et spatiale des formes d'humus sur un transect de 200 mètres de long, passant d'un pâturage sur sols calcaires à la forêt sur silex.

¹Pour la définitions de ces horizons, voir annexe C.2

- Le second volet, orienté sur les processus à court terme, a comme objectif d’approfondir le mode de développement des formes d’humus sur ce substrat siliceux et d’y déterminer un critère d’évolution rapide, soit sur une vingtaine d’années environ.

6.3 Méthodologie

Le niveau d’approche présenté place ce chapitre dans la compréhension d’un système particulier dont les grandes caractéristiques sont présentées au chapitre 1. De plus, les formations superficielles, les formations végétales et les sols sont cartographiés au chapitre 4. Ces derniers sont étudiés dans le détail au chapitre 5.

Mais qu’en est-il de cette mystérieuse forêt... Existe-t-il une correspondance fonctionnelle entre la végétation et les formes d’humus? Comment se développent-elles dans ce contexte?

Ce sont ces questions qui constituent le thème central de ce chapitre.

6.3.1 Choix du transect

Un transect de 200 mètres de long sur une cinquantaine de mètres de large est établi, allant du pâturage boisé à la forêt sur silex, elle-même délimitée au chapitre 4. Elle fait partie de l’alliance végétal *Vaccinio-Piceion* avec un sous-bois riche en espèces acidophiles. Cependant, elle ne se rattache à aucune association phytosociologique connue à ce jour. A l’intérieur du transect, une trentaine de sondages sont effectués de manière préférentielle selon un critère végétal, les synusies herbacées. Ces pseudo-réplicats fournissent une base pour la sélection des sites les plus représentatifs.

La figure (FIG. 6.1) montre le transect avec les profils choisis pour les deux volets confondus.

6.3.2 Long terme

Pour répertorier les formes d’humus, une étape de description est nécessaire afin de rechercher la panoplie de la variabilité maximale. Pour cela, des premières données sont prises sur le terrain. Elles sont complétées, après récolte d’échantillons, par une analyse à la loupe binoculaire selon la méthode Ponge (Ponge, 1984). La mise en parallèle de ces deux descriptions permet de donner un nom aux formes d’humus.

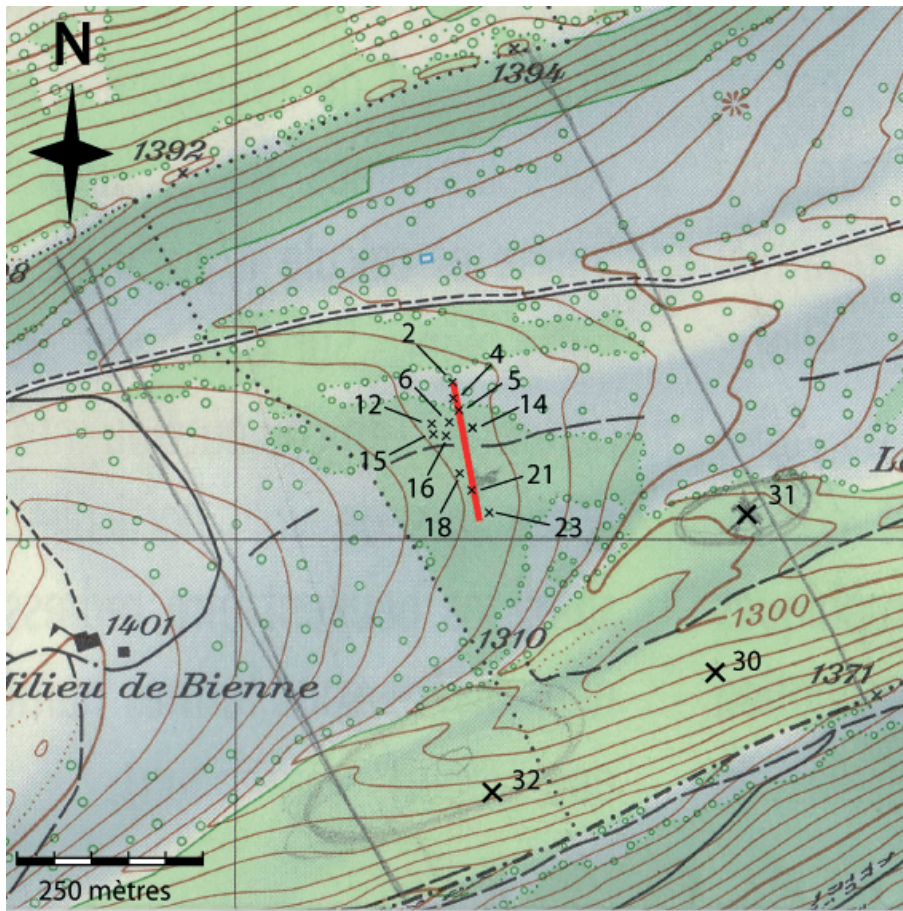


FIG. 6.1 – Transect. Long terme : non remaniés : 2, 4, 5, 12, 16, 21 ; remaniés : 6, 14, 23. Court terme : non remaniés : 12, 21 ; remaniés : 6, 14, 15, 18, 23. Références : 30, 31, 32.

Trois stations de référence sont choisies dans des milieux autres que la forêt sur silex. Les profils d'humus récoltés dans ces zones permettent une comparaison avec les formes d'humus du transect.

6.3.3 Court terme

Ce deuxième volet consiste en une recherche pédogénétique sur substrat remanié.

En effet, la forêt sur silex a subi, il y a une quinzaine d'années, des perturbations anthropiques appliquées par les forestiers. Dans un objectif de favoriser la repousse des jeunes épicéas, ils ont raclé, à l'aide de tracteurs

et de pelles mécaniques, les horizons supérieurs du sol, soit environ les dix premiers centimètres. Des zones bien précises sont ainsi décapées à différents endroits de la forêt, induisant des changements des conditions microclimatiques, d'où le terme de "substrat remanié".

Suite à cette information, différentes analyses pédologiques sur la terre fine de certains sites raclés ainsi que sur la terre fine de certains sites vierges permettent de comparer les résultats des deux types de station. Le choix de ces analyses se base sur les informations qu'elles fournissent sur l'évolution de l'humus. En complément à cela, les stocks de carbone organique (C_{org}) sur un volume de terre connu sont calculés. Des analyses dites "Rock-Eval pyrolysis" sont également faites dans l'objectif de déterminer le type et la qualité de la matière organique ainsi que caractériser et quantifier sa dégradation. Ces données devraient permettre de déterminer un critère d'évolution rapide dans la zone à silex.

6.4 Long terme

6.4.1 Matériel & Méthodes

Sur le terrain : échantillonnage et prise de données

Formes d'humus. Chacune des trente formes d'humus est décrite avec précision selon l'exemple de fiche en annexe C.1 et des photographies sont prises. Pour plus de détails sur la prise de données, se reporter au manuel du Laboratoire Sol & Végétation (LSV, 2006a). De plus, des données environnementales (topographie, pente, coordonnées GPS, altitude, pH Heilige de l'horizon organo-minéral) complètent ces descriptions.

Au total, trois sites remaniés (6, 14, 23), cinq sites intacts (2, 4, 5, 12, 16, 21) et trois références hors transect (30, 31, 32) sont choisis pour l'établissement de la typologie.

Les profils de référence sont prélevés

- dans un milieu humide ou bas-marais (30)
- dans une Hêtraie à érable (31)
- dans le "bouurrelet à myrtilles"² (32).

Les douze formes d'humus correspondantes sont récoltées d'après la méthode Ponge (1984). Cette méthode consiste à dégager au couteau à

²Voir chapitre 4

pain une tourelle de 5 cm x 5 cm de surface x 10 cm de hauteur et à récolter les différents horizons ou microcouches, délimités sur des critères macroscopiques. Chacun est conservé dans des gobelets en plastique hermétiquement fermés afin d'y ajouter de l'alcool à 95%.

Végétation. En parallèle à cela, la végétation de ces douze stations est étudiée à l'aide de relevés synusiaux et de données semi-quantitatives. D'une part, le code d'abondance-dominance de Braun-Blanquet (Braun-Blanquet & Pavillard, 1928), qui combine l'abondance et la dominance de chaque espèce végétale, est noté. D'autre part, le code d'agrégation, constitué de cinq classes (1 à 5), qui représente une estimation globale du mode de répartition spatiale et du degré de dispersion des espèces (Gillet, 2006), complète le relevé.

En laboratoire : typologie fonctionnelle et spatiale

Formes d'humus. Les formes d'humus sont analysées en laboratoire toujours selon la méthode Ponge (1984). Il s'agit de compter les proportions volumiques des catégories de macrorestes, établies sur la base des premiers sondages, dans chaque microcouche prélevée.

Pour ce faire, les gobelets contenant les horizons des profils sont déversés dans des boîtes de Petri, de façon à ce que les éléments s'étalent sur une fine couche homogène dans le fond de la boîte. Toutefois, si un horizon présente une épaisseur trop importante, il est divisé dans plusieurs boîtes de Petri. Lors de cette manipulation, il est important de prendre garde à ne pas casser les microstructures présentes.

Ensuite, une grille transparente, du même diamètre que la boîte de Petri et percée de trous, est déposée par-dessus les éléments figurés. Le nombre de trous peut être variable d'un travail à l'autre, mais Rozé (1989) a démontré qu'une moyenne de 100 points permet des résultats statistiquement valables. Dans cette étude, une grille de 300 trous est utilisée.

Le comptage des éléments se fait sous une loupe binoculaire au grossissement 40x, en prenant soin de noter quelle catégorie de macrorestes se trouve sous chacun des trous, sans tenir compte des superpositions. Le manuel du Laboratoire Sol & Végétation (LSV, 2006b) fournit les détails de cette étape.

Ces données permettent de construire des graphiques selon la proportion des macrorestes. En effet, Bernier (1992) a démontré et validé expérimentalement que les proportions observées sont assimilables à des volumes relatifs. Pour simplifier la lecture, ces diagrammes sont

appelés "graphiques Ponge" dans la suite de ce travail.

Nomenclature. Plusieurs auteurs ont établi des classifications des horizons de référence des formes d'humus (annexe C.2). Une correspondance directe ne peut pas être faite, étant donné que les conceptions de ces horizons sont différentes. Deux parmi ces classifications sont couramment utilisées. Il s'agit de celle de Jabiol *et al.* (n.d.), qui se fonde prioritairement sur les caractères des horizons A (horizons organo-minéraux), et de celle de Green *et al.* (1993) qui se base sur le fonctionnement des horizons O (horizons holorganiques).

Le choix de la nomenclature utilisée dans ce travail se porte sur celle de Jabiol, tout en indiquant à titre informatif celle de Green entre parenthèses. La typologie est conçue sur le principe du rattachement des horizons à des "horizons concepts" puis à un "épisolium image" et enfin à une forme d'humus (AFES, 1995).

Végétation. Les espèces végétales ainsi que les codes d'abondance-dominance et d'agrégation des relevés synusiaux sont introduits dans la base de données Phytobase[©]. Des tableaux sont construits sur la base de la présence ou de l'absence des espèces ainsi que sur le taux de recouvrement qu'elles occupent sur la parcelle.

Analyses statistiques. Les données sont traitées dans le logiciel R[©], à l'aide d'analyses multivariées et de tests statistiques. Les analyses factorielles des correspondances (AFC) sont utilisées pour voir la distribution des sites en relation avec

- d'une part les données environnementales (pente, pH, réaction à *HCl*, épaisseur des horizons, présence de calcaire et/ou silice, taille des agrégats (<1 mm, 1 à 2 mm, 2 à 5 mm, 5 à 10 mm, 10 à 20 mm, >20 mm), composition du squelette (blocs, cailloux, graviers), texture, structure et type de l'horizon A),
- d'autre part, les catégories de macrorestes (annexe C.5),
- et enfin les espèces végétales.

Des analyses canoniques des correspondances (ACC) sont également faites pour mettre en relation toutes ces données dans le but de tester l'existence d'un rapport entre les formes d'humus et la végétation.

Cependant, les stations de référence ne sont pas intégrées à ces analyses statistiques pour ne pas fausser les corrélations entre les sites du transect.

6.4.2 Résultats & Interprétations

Remarques

Afin de nommer les différents horizons des épisolums humifères, les descriptions de terrain, les observations des macrorestes et les graphiques des proportions volumiques sont mis en parallèle.

Néanmoins, dans le milieu étudié, un problème se pose lorsqu'il s'agit de différencier un horizon OH d'un horizon Ah de juxtaposition. Le premier est un horizon holorganique, constitué de débris végétaux bien décomposés dont l'origine est en principe peu reconnaissable et contenant plus de 70% de matière organique fine. Le second est un horizon organo-minéral qui, comme son nom l'indique, contient de la matière minérale juxtaposée à une forte proportion de matière organique. Cependant, la présence de grains minéraux peut être observée dans les horizons OH, ce qui rend le diagnostic particulièrement difficile. Il est décidé que les éléments conjoints au matériel organique et minéral définissent le type d'horizon. S'il s'agit d'éléments figurés vivants, comme par exemple des racines, l'horizon a un fonctionnement plus proche d'un horizon A. Par contre, s'il s'agit de débris ou éléments résiduels, alors le rattachement est fait à un horizon OH.

Lors d'une étude sur les formes d'humus au Creux-du-Van (NE, Suisse), la richesse des sols en matière organique a posé le même problème. Ces horizons particuliers sont aussi rattachés à des horizons Ah (Rossel, 2004).

De plus, la végétation, la situation climatique (altitude), la géologie (silex) et les remaniements anthropiques de la zone dans laquelle le transect est établi sont propices au développement des bryophytes. Elles sont enracinées dans la litière et constituent parfois l'unique végétation. Il serait dommage de ne pas mentionner leur présence. La nomenclature utilisée dans ce travail est celle de Jabiol *et al.* (n.d.). Elle ne tient pas compte des couches de bryophytes, contrairement à celle de Green *et al.* (1993) qui en fait un horizon propre nommé "s". C'est pourquoi, leur présence est mentionnée ici en tant qu'horizon OFs. Elles peuvent aussi être intercalées avec d'autres résidus végétaux et former un horizon mixte OFr/OFs.

Les horizons notés entre crochet ([]) sont sporadiques.

Lorsqu'aucune précision n'est faite dans le texte, il s'agit de zones non remaniées.

Les types de sol correspondent à des grands ensembles établis sur la base du chapitre 5.

Le comptage des macrorestes s'est fait plus d'un mois après l'échantillonnage, c'est pourquoi il n'y a pas de distinction entre les racines mortes et les racines vivantes.

Etant donné que les graminées sont plus difficilement décomposables par la pédofaune que les autres familles d'espèces herbacées, une distinction entre ces deux termes est faite. Le premier, "graminées", correspond aux familles des poacées, des cypéracées et des joncacées. Le second, "herbacées", sous-entend donc toutes les autres familles susceptibles de composer la strate herbacée sauf les trois mentionnées dans la catégorie des graminées. Les fougères sont comptées dans la catégorie des herbacées.

Les fiches de description se trouvent dans les annexes C.6 à C.17.

Description et typologie des formes d'humus

Station 2 : Oligomull carbonaté (Vermimull)

Description

Le profil d'humus n° 2 se situe à l'extrémité nord du transect, sur une bosse dans un pâturage boisé. Le sol correspondant est un ORGANOSOL CALCAIRE.

Les horizons supérieurs (OLn et OLv) sont fins et sporadiques et d'une épaisseur variable selon les saisons. Ils sont constitués de quelques feuilles d'herbacées de l'année, qui ne s'observent d'ailleurs plus dans le reste du profil. Des tiges de graminées de l'année précédente sont également présentes. Un mince horizon OLt est observable. Il est formé d'amas de feuilles de feuillus squelettisées (apportées par le vent) et de tiges de graminées blanchies, le tout colmaté par des turricules. Les débris d'herbacées et de feuillus y sont rares (4%) alors que les feuilles, tiges et stolons de graminées dominent (78%). A 1.5 cm de profondeur, les débris sont de mieux en mieux fragmentés, les déjections holorganiques de plus en plus nombreuses et la transition avec l'horizon organo-minéral est observée ([OFR]/Ah). Dans celui-ci, trois catégories se retrouvent : 1/3 correspond à des déjections holorganiques et organo-minérales confondues, 1/3 à des résidus de graminées et de résineux et 1/3 à des racines et des stolons. Le pH est de 7 dans cet horizon clairement biomacrostructuré. Bien que situé dans un pâturage boisé et à distance notable d'épicéas, des aiguilles se retrouvent tout au long du profil.

Interprétation & Conclusion

Cet oligomull carbonaté est le profil du transect qui subit le plus l'influence du milieu calcaire. La pédogenèse du sol sur et avec lequel il se développe suit la voie carbonatée avec stabilisation de la matière organique.

La litière est riche en espèces herbacées, donc une litière améliorante qui se fait facilement décomposer par la faune du sol. L'activité notable des vers de

terre est prouvée par l'observation de turricules à la surface du sol. Ils sont les principaux responsables de la disparition et fragmentation rapide des litières ainsi que de la formation d'horizons organo-minéraux biomacrostructurés (Jabiol *et al.*, n.d.). Les horizons OL sont fins. Les herbacées sont majoritaires en surface, puis la tendance s'inverse au profit des graminées. Ces dernières, plus difficilement dégradables car plus riches en lignines (tanins, phénols) et lipides, échappent encore à l'attaque de la faune du sol et forment l'horizon OLt. Dans un tel contexte, la formation d'un mull est attendue. Mais il est vrai que la présence d'un horizon OF peut correspondre à celle d'un dysmull. Cependant, il est fin et sporadique et ne joue pas un rôle discriminant dans le fonctionnement de ce profil. C'est pourquoi il est ici négligé et cette forme d'humus est classée dans le groupe des oligumulls. Il faut noter également le tassage important lié au bétail et la présence d'aiguilles qui témoignent de la végétation antérieure, à savoir la forêt.

Station 4 : Hydromull à bioturbation intense (Hydromull)

Description

Placé au centre d'une bande argileuse (argiles de l'Oxfordien) dans un pâturage boisé, le profil n°4 se développe sur un RÉDOXISOL. Il reflète clairement le piétinement prononcé du bétail. Les horizons ne sont pas nettement différenciables et leurs limites quasiment indéfinissables.

Au même niveau que l'horizon OLn, des turricules, des stolons et des racines fines sont observables. De même, il est difficile de faire la distinction entre la litière de plus ou moins un an ([OLn] et [OLv]). Un horizon de fragmentation est tout de même présent. Il contient quelques résidus de résineux essentiellement, entremêlés aux bryophytes vivantes et mortes (OFr/OFs). L'horizon sous-jacent laisse deviner une structure grumeleuse. Il est constitué de plus de la moitié d'agrégats organo-minéraux et d'une faible proportion de résidus difficilement dégradables (aiguilles, tiges et stolons de graminées). Le pH se situe entre 4 et 5. Sur le terrain, du mycélium est observable par endroit, mais il n'apparaît pas dans le profil prélevé. De plus, des cailloux calcaires et quelques-uns siliceux sont retirés de la terre lors de l'échantillonnage.

Interprétation & Conclusion

A une dizaine de mètres au sud du profil n°2, cette forme d'humus se distingue nettement de la précédente. La terre est très humide et la microtopographie marquée. L'eau s'accumule dans les creux, créant ainsi des conditions d'anoxie qui réduisent l'activité biologique. De plus, des champignons

sont observables par endroit. Quant aux bryophytes, elles colonisent certaines microbosses. Le piétinement des bovins sur ce sol argileux ne permet pas l'installation d'un tapis herbacé continu. Le pH de l'horizon A, décarbonaté, diminue clairement par rapport au profil n°2. L'influence des silex n'est pas considérable, bien qu'ils soient déjà présents.

D'une manière générale, ce profil est marqué par l'hydromorphie et une intense bioturbation. La présence de taches d'oxydation classe cette forme d'humus dans la catégorie des hydromulls.

Station 5 : Dysmull acide (Rhizomull)

Description

Ce profil est prélevé dans la mégaphorbiaie, entre le pâturage et la forêt sur silex. Le sol correspondant est un BRUNISOL OLIGOSATURÉ.

En se référant au "graphique Ponge" (annexe C.8), ce profil peut être divisé en deux parties. L'une de 0 à 3 cm (OLn, [OLv], OFr) et l'autre de 3 à 5 cm (A).

La première moitié est à son tour formée de deux catégories, dont environ une moitié de débris de résineux et le reste composé de débris de feuillus, herbacées, graminées et déjections holorganiques. La litière des espèces typiques de la mégaphorbiaie (*Adenostyles alliariae*, *Senecio alpestris*, *Stellaria nemorum*) est riche en azote et vite décomposée. Il ne reste que des aiguilles, des morceaux de fruit de conifère, d'écorce et quelques brindilles dans l'horizon [OLv]. Ces aiguilles se décomposent lentement et s'accumulent sur une épaisseur de 2 cm (OFr) pour enfin être reprises progressivement dans l'horizon A sous-jacent. Ce dernier comprend 40% de déjections organo-minérales, 20% de résidus végétaux (résineux, graminées), 16% de minéraux (silex) dès 4 cm de profondeur, 14% de racines fines et 6% de bois en décomposition. C'est un horizon biomacrostructuré à pH 4.

Il faut également noter la présence constante de mycélium dès 0.5 cm.

Interprétation & Conclusion

Situé dans une mégaphorbiaie, entre le pâturage et la forêt sur silex, ce dysmull acide se développe selon les deux influences.

D'une part, une épaisse couche d'aiguilles, litière acidifiante, sur les trois premiers centimètres recouvre un mince horizon organo-minéral. D'autre part, la structure nettement grumeleuse de cet horizon, ainsi que l'observation de déjections organo-minérales à la surface révèlent une activité importante des vers anéciques. Ils sont d'ailleurs aidés par d'autres espèces de la méso- et microfaune observées lors du comptage à la loupe binoculaire et

dont la présence est confirmée grâce aux déjections holorganiques. Il est intéressant de noter que malgré l'acidité de la litière, l'activité biologique n'est pas réduite et l'intégration de la matière organique à la matière minérale se fait tout de même. L'influence du milieu calcaire, plus riche en minéraux que les silex, joue probablement un rôle dans ce fonctionnement.

Station 6 : Dysmull acide à structure rhizogène (Mullmoder)

Description

En pénétrant dans la forêt, le caractère acide de celle-ci se reflète dans les formes d'humus. Le profil de la station 6 est creusé dans une ouverture de la végétation où des blocs de calcaire et de silice en même proportion s'observent à la surface d'un BRUNISOL OLIGOSATURÉ. Ce site fait partie des zones remaniées.

La litière de moins d'un an (OLn) est composée en grande majorité de feuilles d'herbacées entières. Du mycélium est déjà présent et s'observe jusqu'à 4.5 cm de profondeur. Ensuite, il reste principalement des aiguilles (OLv). En dessous, sur 0.5 cm, les bryophytes dominent, avec quelques résidus de feuillus et de résineux perdus entre elles (OFr/OFs). L'horizon OFr/OFm s'étend sur 3 cm, avec la fragmentation de plus en plus fine des résidus, l'augmentation de la proportion de matière organique fine (déjections holorganiques) et l'apparition de racines fines. Dans l'horizon OFm, qui fait la transition avec l'horizon A, les proportions de ces catégories diminuent au profit du matériel organo-minéral. Enfin, l'horizon A, biomacrostructuré à structure microgrumeleuse et dont le pH est de 4, contient autant de cailloux calcaires que siliceux.

Interprétation & Conclusion

Bien que sur le "graphique Ponge" (annexe C.9), les racines fines ne soient pas bien représentées, la morphologie des horizons holorganiques reflète leur importance dans la structuration de cet épisolium humifère, d'où la caractéristique "à structure rhizogène".

La transition entre ces horizons et l'horizon organo-minéral est nette. Il est possible que la suppression des horizons de surface par les forestiers contribue à cette distinction. En découvrant la partie supérieure uniquement, la forme d'humus attendue serait de type moder, mais la structure de l'horizon A suggère la présence de vers anéciques qui incorporent le matériel frais au matériel minéral et forment alors un dysmull.

Station 12 : Dysmoder acide à structure mycogène (Résimor)**Description**

L'échantillonnage de la forme d'humus n°12 est réalisé au centre d'une synusie arbustive de sorbiers (*Sorbus aucuparia*), qui n'a pas subi de perturbations anthropiques. Le sol correspondant est un PODZOSOL OCRIQUE.

La litière d'épicéas et de sorbiers est abondante et continue. Elle abrite des enchytréides, dont les déjections, qui ne sont pas reprises par les vers anéciques, contribuent à la formation des horizons OH entre 3 et 8.5 cm. En surface, les amas de feuilles et d'aiguilles sont collés par du mycélium (OLn et OLv). L'horizon sous-jacent (OFr) contient encore plus de mycélium, qui colmate toujours les débris, bien que ces derniers soient plus fragmentés. En dessous, un horizon OFm/OHr, avec une majorité de déjections, racines fines et mycélium, fait la transition avec l'horizon OHr. Il contient de plus gros amas de débris figurés, mais il est difficile de voir de quoi ils sont faits. De 7.5 à 8.5 cm, les débris ne sont plus reconnaissables (OHm). En dessous, l'horizon Ah s'étend sur encore 10 cm. Celui-ci a un pH de 4, avec une consistance grasse et collante et présente clairement une structure poivre et sel due aux déjections holorganiques juxtaposées aux grains de silex visibles à l'oeil nu.

Interprétation & Conclusion

La transition graduelle entre les horizons OH et A permet de classer cet épisolum humifère dans le groupe des moders plutôt que dans celui des mors. En effet, tous les horizons s'intègrent petit à petit les uns aux autres, dans une succession classique. La grande quantité de mycorhizes dans ce profil d'humus et son influence sur son fonctionnement lui donnent le qualificatif "à structure mycogène".

Station 14 : Hémimoder acide à structure rhizogène (Mormoder)**Description**

Développé sur un site remanié, le profil de la station 14 est au coeur d'un tapis de mousses, sans couvert végétal, sur une faible pente d'environ 2%. Le sol de cette station fait partie du groupe des PODZOSOLS OCRIQUES.

L'horizon OLn, très épais, représente les feuilles des myrtilles qui poussent à l'abord de ce tapis. Ces feuilles s'intègrent rapidement dans un horizon de mousses, mais certaines de l'année d'avant restent bloquées à leur surface, d'où un mince horizon OLn/[OLv]. Dans l'épaisse couche de bryophytes (4.5 cm) ces feuilles sont décomposées et leurs résidus s'y mélangent (OFs). Dès 7 cm de profondeur, et ce jusqu'à 8.5 cm, un horizon très humifère, noir,

gras avec des grains de silex, forme une matrice entre les abondants cailloux siliceux. Il est déterminé comme un horizon Ah de juxtaposition, dont le pH est de 4.

Interprétation & Conclusion

Cet épisolum humifère peut être résumé en trois catégories :

1. les mousses mortes
2. leurs nombreuses racines fines
3. les silex.

Son fonctionnement est donc étroitement lié à la présence des bryophytes et à la faune considérable qu'elles accueillent, qui est elle-même une actrice primordiale dans la structuration des épisolums humifères.

La forme d'humus attendue dans cette station serait de type mor. Il pourrait s'agir ici, étant donné que les horizons supérieurs ont été décapés, d'une forme transitoire entre un ancien mor dont les horizons O ont été raclés et un futur mor formé par la décomposition des racines fines des mousses et par l'accumulation des boulettes fécales de leurs nombreux habitants.

Station 16 : Dysmull acide actif (Rhizomull)

Description

C'est dans une tache de graminées, sur un PODZOSOL OCRIQUE, que cette forme d'humus est prélevée.

L'horizon OLn est sporadique et contient une majorité de feuilles et tiges de graminées. Dans l'horizon sous-jacent (OLv), la litière vieillie est stoppée à la surface de bryophytes qui incorporent ensuite des résidus fragmentés, formant ainsi un troisième horizon OFs. Encore plus en profondeur, la question se pose de savoir s'il s'agit d'un horizon de fragmentation ou d'un horizon OLv recouvert par ces mousses. La décision est prise sur la base de la présence de feuilles d'herbacées et de graminées ainsi que d'aiguilles déjà attaquées par les champignons, qui forment bien un horizon à part entière (OFr). Grâce à la faune du sol, dont la présence est confirmée par les déjections holorganiques dès 0.7 cm, ces débris s'assimilent alors progressivement à l'horizon A très riche en racines fines.

Interprétation & Conclusion

Il est surprenant de découvrir un tel horizon organo-minéral dans le contexte de ce transect. Dans les formes d'humus voisines, les conditions ne

permettent pas le développement d'un horizon A biomacrostructuré. Cependant, ce dysmull acide (pH 4) a un fonctionnement autre qui permet tout de même une structure grumeleuse d'un mince (2.5 cm) horizon A. Cela peut être lié d'une part à la densité des sorbiers présents, dont les feuilles et inflorescences apportent une litière fraîche moins acide que celle des résineux, d'autre part à l'activité plus importante des lombrics dans cette station et enfin à la présence du système racinaire des graminées qui fournissent une litière endogée abondante sous forme de racines mortes (Havlicek, 1999). Il faut également noter que cette station se situe dans une clairière particulièrement bien ensoleillée.

Station 21 : Mor à structure feutrée (Humimor)

Description

Le profil n°21, développé sur un PODZOSOL OCRIQUE, est creusé sous la couronne d'un épicéa, sur une faible pente (<5%). Tout comme le profil n°12, il présente une succession d'horizons typique, de la litière fraîche aux horizons plus fragmentés et riches en matière organique fine (OLn, OLv, OFr, OFm, OHr, OHf). Les horizons sont distincts et les limites ondulées.

Le "graphique Ponge" (annexe C.13) montre clairement l'influence de la litière de l'épicéa. De la surface à 4 cm de profondeur ([OLn], OLv, OFr) elle occupe une proportion largement majoritaire par rapport aux autres catégories de macrorestes. Des déjections holorganiques se mélangent déjà aux aiguilles de plus d'un an, puis sont en augmentation constante jusqu'à l'horizon organo-minéral. L'horizon de transition OFr/OFm s'étend sur 1.5 cm, où la rare faune s'active pour décomposer de plus en plus les débris figurés, qui s'accumulent ensuite sur 5.5 cm (OFm, OHr, OHf). L'horizon sous-jacent Ah contient un pourcentage de cailloux et blocs de silice élevé entre lesquels la matière organique fine est juxtaposée à la matière minérale, formant de gros agrégats autour des racines. Il n'y a pas de structure nette visible, cet horizon est d'une manière générale cendreuse. L'hypothèse qu'il s'agit d'un horizon E peut être avancée. Il faut relever également les taches de bois en décomposition et la grande quantité de racines fines dès 2 cm de profondeur, soit dans les horizons OHr et OHf.

Interprétation & Conclusion

La forme d'humus décrite correspond à un mor. Cependant, un décalage se présente entre la description de terrain qui rattache ce profil à une forme d'humus du groupe des moders et l'observation à la loupe binoculaire qui

révèle la grande quantité de débris non reconnaissables et de déjections holorganiques, qui le place alors dans le groupe des mors.

De par sa situation sous la couronne d'un épicéa, la litière est composée essentiellement d'aiguilles, litière acidifiante et difficilement altérable. De plus, l'épais horizon OH (OHr et OHf) et la transition brutale avec l'horizon Ah sont des preuves de la faiblesse de l'activité biologique dans ce contexte écologique extrêmement acide. Un paradoxe se soulève cependant, à savoir que la zone de la couronne d'un épicéa reçoit les égouttements des branches, ce qui favorise normalement l'activité biologique. La présence des radicules traçantes de l'arbre, en grande quantité dans les horizons OHr et OHf, qui confèrent une structure feutrée et aèrent le sol par le pompage qu'elles y exercent, a aussi un effet positif sur l'action de la pédofaune. Cependant, il semble que le contexte acide et siliceux prenne ici le dessus.

Station 23 : Hémimoder à structure mycogène (Mullmoder)

Description

La station 23 ressemble de près à la station 14, soit un tapis de mousses sans végétation qui le surplombe. Le sol fait aussi partie du groupe des PODZOSOLS OCRIQUES. Néanmoins, la pente est légèrement plus forte (5%), et de jeunes épicéas y ont pris racines. Toutes deux sont des zones remaniées par les forestiers.

Quant à la forme d'humus, elle se présente également sous la forme simplifiée de mousses mortes et leurs racines sur les silex³. Les blocs et cailloux de silex sont abondants dans tout le profil et pas uniquement dès l'horizon Ah, comme c'est le cas dans la station 14.

La litière fraîche y est beaucoup moins abondante et même sporadique. Il s'agit de quelques feuilles de myrtille isolées ([OLn]). Par contre, en ce qui concerne l'évolution de cette litière au cours du temps, elle subit la même intégration à travers les bryophytes que dans la station 14 ([OLv] puis OFs), bien qu'elles soient ici moins denses. L'horizon Ah contient un mycélium abondant qui se développe entre les silex (FIG. 6.2), ce qui provoque la précipitation chimique des molécules organiques solubles, la construction d'agrégats solides fortement liés aux racines fines et donc la formation d'un horizon A d'insolubilisation. Une autre différence au niveau de l'horizon Ah pourrait éventuellement expliquer la repousse des jeunes épicéas dans cette station, et non dans la station 14.

³Voir la description de la station 14.



FIG. 6.2 – Mycélium abondant entre les silex

Interprétation & Conclusion

La même hypothèse que celle établie pour le profil n°14 concernant le passé et l'évolution probable de cette forme d'humus peut être avancée. En ce qui concerne la repousse de jeunes épicéas dans cette station et non dans l'autre, il se peut qu'elle soit favorisée par la grande quantité de silex, ce qui augmente la porosité du sol et permet aux racines de s'enfoncer plus en profondeur où elles puisent l'énergie utile à la croissance de l'arbre. Il est aussi possible que la présence de mycélium et mycorhizes, qui jouent un rôle essentiel dans la nutrition des plantes, soit un facteur positif pour les épicéas. Cependant, des analyses plus poussées sont nécessaires à la compréhension de ce phénomène.

Station 30 : Hydromull peu actif à tendance anmoor (Hydromull à tendance anmoor)

Description

Ce prélèvement, l'une des trois références, est réalisé dans une station en dehors du transect, dans un milieu humide. Il s'agit d'un profil dans un *Filipendulion* classique, développé sur un RÉDUCTISOL TYPIQUE.

La litière de l'année n'est pas présente, seule la litière vieillie de feuillus et de graminées est sporadiquement observable ([OLv]). En dessous, quelques résidus faiblement fragmentés forment un mince horizon OFr1 (0.5 cm). Les bryophytes occupent les 2 cm suivants (OFs), puis, des résidus plus fragmentés qui ont passé à travers (OFr2) s'intègrent rapidement à l'horizon Ah.

Interprétation & Conclusion

La forme d'humus correspondante est une forme peu active de mull en conditions temporaires d'anoxie. Etant donné que le prélèvement est fait en période de saturation en eau du sol, la distinction entre les genres hydromull et anmoor n'est pas nette. L'horizon A paraît en effet grumeleux une fois séché à l'air libre et des taches d'hydromorphie apparaissent. Cependant, ce même horizon est fortement humifère, à consistance grasse et structure massive lorsqu'il est à l'état humide. De plus, la présence d'un horizon OFr, comme le pH relativement bas (5), laissent supposer que l'activité biologique est réduite. Mais le rattachement au groupe des hydromoders n'est pas pour autant justifié, étant donné l'absence d'un horizon OH. C'est pourquoi la dénomination "peu actif à tendance anmoor" qualifie cette forme d'humus.

Station 31 : Dysmull peu actif carbonaté (Vermimull carbonaté)

Description

Le deuxième profil de référence présenté ci-dessous est échantillonné dans une Hêtraie à érable, au sud-est du transect, sur un BRUNISOL OLIGOSATURÉ.

D'une manière générale, confirmée par l'aspect du "graphique Ponge" (annexe C.16), ce profil est formé de deux parties. La première, sur 2.5 cm, contient une litière riche en aiguilles et deux types d'horizons de fragmentation, OFr puis OFm. La seconde, jusqu'à 6.5 cm, correspond à un horizon organo-minéral relativement acide (pH 5), contenant encore certains résidus végétaux et des morceaux de bois en voie de décomposition, particulièrement coriaces pour les organismes décomposeurs. La description de terrain fait part de la présence de mycélium, mais en quantité insuffisante pour qu'il apparaisse dans l'échantillon prélevé.

Interprétation & Conclusion

La présence de déjections holorganiques dans la litière et la structure biomacrostructurée de l'horizon A démontrent une activité biologique intense, mais la quantité importante d'aiguilles, litière acidifiante, la ralentit. La preuve en est que les horizons de fragmentation se forment, bien qu'ils se fondent peu à peu à l'horizon A sous-jacent. L'intégration du matériel organique au matériel minéral est lente, d'où le qualificatif de "peu actif".

Station 32 : Hémimoder peu actif à structure feutrée (Hémimor)**Description**

Le profil d'humus n°32 est la troisième référence. Il s'agit d'une forme d'humus peu active dans une forêt d'épicéas sur une pente de 10%, dans laquelle des buttes à sphaignes se forment (bourrelet à myrtilles⁴). Le prélèvement est fait sur l'une d'elle. Le sol correspondant est probablement un RÉDOXISOL, mais aucune fosse pédologique ne permet de le confirmer.

Les rares feuilles de myrtille et aiguilles qui composent la litière, neuve ([OLn]) et vieille ([OLv]), sont sporadiques. Elles sont rapidement fragmentées et attaquées par la faune et les champignons, ce qui forme l'horizon OFr. Cette dégradation se poursuit en profondeur, constituant ainsi un horizon de transition (OFr/OFm). Un horizon organo-minéral de juxtaposition humifère (Ah) à pH 4 s'étend de 2.5 à 5 cm de profondeur.

Interprétation & Conclusion

Bien que prélevé sur une butte à sphaigne, l'analyse en laboratoire ne relève aucune trace de ces dernières. Par contre, la quantité importante de résidus à l'allure de racines fines dans l'horizon Ah correspondent probablement aux tiges de ces sphaignes et donne à cette mince forme d'humus une structure feutrée.

Analyses statistiques

Les résultats des analyses statistiques sont présentés et discutés ci-dessous.

6.4.3 Discussion**Comparaison morphologique et fonctionnelle**

Les formes d'humus décrites au chapitre 6.4.2 présentent différentes successions verticales d'horizons et des caractères morphologiques propres à chacune. Cela est lié d'une part aux stades d'évolution de la matière organique, spécifiques à chaque contexte pédoclimatique (AFES, 1995), et d'autre part aux liaisons organo-minérales et à l'activité biologique, qui reflètent la vitesse de décomposition de la matière organique fraîche et le turnover de la fraction humifiée (Duchaufour, 1995). En effet, le transect tracé dans le cadre de ce travail traverse divers environnements, avec pour chacun d'eux un apport de

⁴Voir chapitre 4

litière et des conditions d'accueil de la pédofaune caractéristiques. Les relations entre la végétation et les formes d'humus sont discutées dans la section suivante.

Tout d'abord, il est important de constater les changements physico-chimiques qui se déroulent d'un bout à l'autre du transect. Le pH mesuré sur le terrain et confirmé par les analyses en laboratoire qui reprennent certains sites démontre une tendance à l'acidification, du pâturage vers la forêt. Le pH diminue progressivement et passe de 7 à l'extrémité nord du pâturage (station 2) à 4.5 dans la bande argileuse (station 4), puis à 4 dès la mégaphorbiaie (station 5) et reste alors constant (pH 4) dans la forêt (stations 6, 12, 14, 16, 21, 23,).

Les stations étudiées sont choisies sur le critère des synusies végétales (annexe C.3), donc il est évident que les apports des litières sont singuliers. De plus, tout l'échantillonnage est fait en automne 2006, ce qui permet une correspondance entre les horizons OLn et OLv des stations. Dans le pâturage (station 2) ils sont fins et sporadiques, alors que dans la forêt ils peuvent présenter les mêmes caractéristiques (stations 16, 21, 23), ou alors atteindre des épaisseurs de 2 cm (stations 6 et 14). Cependant, plusieurs facteurs rentrent en ligne de compte pour une pareille comparaison. Déjà, la composition floristique détermine le type de litière (améliorante ou acidifiante). En effet, l'analyse factorielle des correspondances (AFC) (FIG. 6.3) relate que les sites 2 et 16 sont corrélés aux résidus de graminées, mais anticorrélés au site 5. Le site 21, sous la couronne d'un épicéa, est en effet lié aux résidus de résineux. Il faut cependant noter que les horizons OLn et OLv des stations 2 et 21 sont d'une épaisseur similaire, mais la différence se situe au niveau de la fragmentation, l'accumulation et l'intégration de cette litière dans les horizons sous-jacents. Beniamino *et al.* (1991) ont d'ailleurs démontré qu'il n'existe pas de relation entre l'accumulation et la chute de la litière.

Les horizons de fragmentation sont très prononcés dans les profils des stations 5, 6, et 21, un peu moins dans les profils des stations 12, 16, 30, 31 et 32 et fins dans les profils n°2 et n°4. Les deux profils remaniés, n°14 et n°23, ne présentent pas de tels horizons. En considérant que ces horizons existaient avant le passage des machines et qu'ils ont été supprimés par celles-ci, il se peut fort bien que leur formation se mette en place, mais qu'actuellement il n'y en ait pas encore de traces.

L'activité biologique est moindre dans les profils n°12 et n°21 qui présentent dans leur morphologie un horizon OH. Cela suggère que l'acidité y est

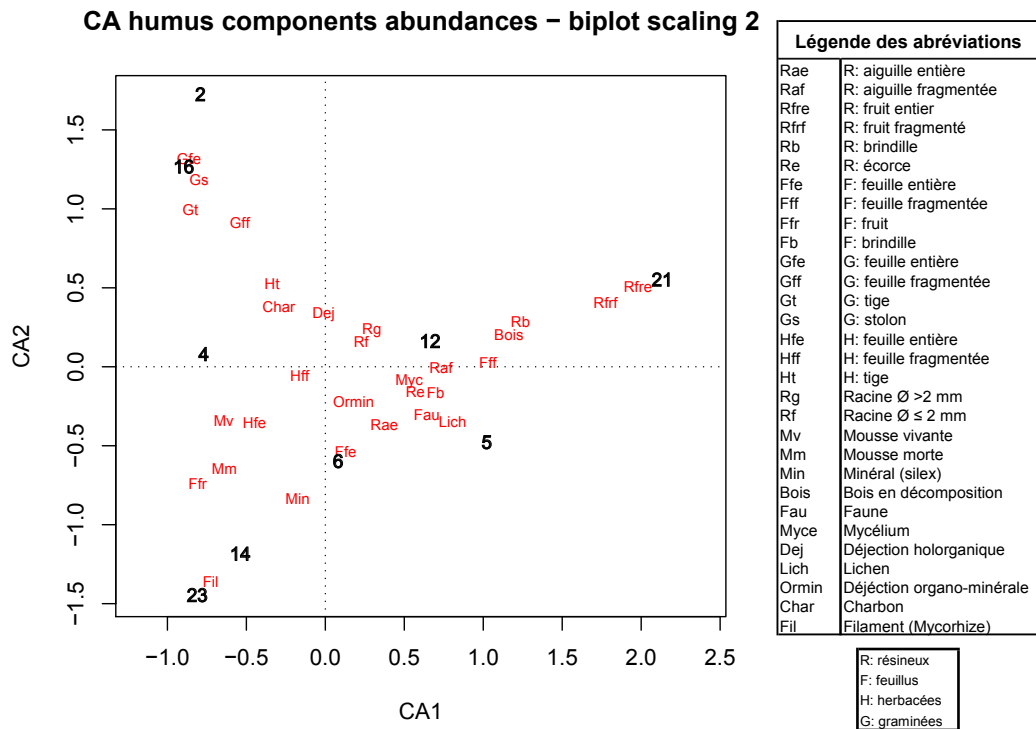


FIG. 6.3 – Projection des variables et des échantillons sur les deux premières composantes principales.

particulièrement forte. L'AFC montre que ces deux sites sont bien corrélés aux résidus difficilement altérables et qu'ils s'opposent aux profils n°14 et n°23, tous deux remaniés, qui présentent actuellement dans leur morphologie très peu de débris non reconnaissables. De plus, l'insuffisance d'azote freine l'activité microbienne et ralentit la minéralisation des débris. Ils s'accumulent et forment des complexes résiduels migrant en profondeur qui peuvent être responsables de la podzolisation. Malheureusement, les profils sont creusés jusqu'à la limite inférieure du A uniquement, ce qui ne permet pas d'affirmer que ces formes d'humus se développent sur des PODZOSOLS. Cependant, les notes de terrain relatent d'horizons sous-jacents gris clair et cendreaux dans les deux cas, ce qui pourrait correspondre à des horizons d'éluviation E.

La structure de l'horizon organo-minéral évolue dans le même sens que le pH. Du pâturage vers la forêt, elle se transforme d'un type nettement biomacrostructuré (stations 2, 4, 5) vers un type toujours biomacrostructuré mais microgrumeleux (station 6). Puis, dans les stations 12 et 14, elle s'en-

richit en matière organique fine juxtaposée à la matière minérale et forme une matrice grasse et collante autour des silex. La station 21 présente les mêmes caractéristiques que ces deux dernières, mais le sol présente ici une texture cendreuse. Deux autres stations font exception à ce schéma. La première est la station 16, au centre de la tache de graminées dans la forêt, qui présente une belle structure grumeleuse. Comme déjà énoncé plus haut, il est possible que cela soit lié à la litière de sorbiers, à l'activité plus intense des vers anéciques, au système racinaire des graminées et à l'intensité de l'ensoleillement. La seconde est la station 23, remaniée, dont l'horizon A d'insolubilisation forme des agrégats autour des racines, sous l'influence des champignons.

Il est également important de noter la contribution des bryophytes dans le fonctionnement de certains épisolums humifères. Les analyses statistiques regroupent deux des sites remaniés (14 et 23), qui sont corrélés aux mousses mortes et vivantes.

Relation humus-végétation

La végétation et le sol ne peuvent pas être considérés indépendamment. Des relations verticales et horizontales unissent ces deux systèmes, interdépendants au point de vue fonctionnel (Havlicek *et al.*, 1998). Ils évoluent ensemble, mais à des vitesses différentes. L'épisolum humifère fait partie du sol, mais peut être à son tour considéré comme un système à part entière, étroitement lié aux deux autres. En effet, le renouvellement de la strate arborescente et la formation des horizons minéraux se compte en siècles, alors que celui de la strate herbacée et de l'épisolum humifère se compte en années. Toute perturbation dans la végétation induit des changements significatifs dans les formes d'humus, qui en gardent néanmoins des traces (Bernier & Ponge, 1994). En effet, la couverture végétale est fortement corrélée à la qualité physico-chimique des horizons de surface (Gobat, 1990). Les remaniements anthropiques appliqués à certaines zones de la forêt ont donc perturbé ces systèmes en place.

Le tableau (TAB. 6.1) résume les correspondances entre les synusies végétales et les formes d'humus. Néanmoins, les résultats des analyses canoniques de correspondance entre les formes d'humus et la végétation ne sont pas interprétables. Le gradient qu'il existe dans la structure végétale du pâturage à la forêt ainsi que la proximité des espèces présentes d'un site à l'autre ne permettent pas de tirer de conclusions significatives. De plus, les relevés sont fait sur 1 m², ce qui ne représente pas l'aire minimale. Cependant, plusieurs points intéressants sont à soulever.

TAB. 6.1 – Résumé des caractéristiques générales des formes d’humus étudiées

Sites	Végétation	Sol	Formes d'humus	Qualificatifs	Remarques
Intacts					
2	Pâturage boisé	Organosol calcaire	Oligomull	carbonaté	tassé par bétail
4	Pâturage boisé	Rédoxisol	Hydromull	bioturbation intense	sur bande argileuse
5	Mégaphorbiaie	Brunisol oligosaturé	Dysmull	acide peu actif	transition pâturage-forêt
12	Forêt	Podzosol ocrique	Dysmoder	à structure mycogène	synusie de sorbiers
16	Forêt	Podzosol ocrique	Dysmull	actif	dans une tache de graminées
21	Forêt	Podzosol ocrique	Mor	à structure feutrée	sous la couronne d'un épicéa
Remaniés					
6	Forêt	Brunisol oligosaturé	Dysmull	à structure rhizogène	dans une ouverture de la végétation
14	Forêt	Podzosol ocrique	Hémimoder	à structure rhizogène	sous un tapis de mousses
23	Forêt	Podzosol ocrique	Hémimoder	à structure mycogène	sous un tapis de mousses + jeunes épicéas
Références					
30	<i>Filipendulion</i>	Réductisol	Hydromull	à tendance anmoor	
31	Hétraie à érables	Brunisol oligosaturé	Dysmull	peu actif carbonaté	
32	Forêt	Rédoxisol	Hémimoder	peu actif à structure feutrée	

Premièrement, les formes d’humus qui se développent sous des végétations d’herbacées ou de graminées tendent à un fonctionnement correspondant au groupe des mulls. Par contre, dans la pessière, la litière est acidifiante et les formes d’humus se rapprochent du groupe des moders, voire des mors. Un gradient est donc visible du pâturage à la forêt. Les formes d’humus sont de moins en moins actives.

Deuxièmement, aucune correspondance ne s’observe entre les formes d’humus des sites remaniés. En effet, la végétation qui colonise les sites 14 et 23 n’est pas la même que celle qui pousse sur le site 6. Mais il est clair que le microclimat, les niches écologiques de la faune et la litière jouent des rôles considérables. De plus, il est probable que l’échelle d’approche choisie ici ne soit pas parfaitement appropriée dans le cadre de cette étude.

Enfin, concernant les bryophytes, leur développement s'observe sur les trois sites remaniés et pour deux d'entre eux (14 et 23), elles constituent l'unique végétation en place. En effet, elles colonisent de façon préférentielle les végétations basses, et lorsque les hautes herbes s'installent, la litière s'accumule et les mousses régressent (Havlicek, 1999). De plus, elles tiennent une place primordiale dans les écosystèmes forestiers de par les réseaux racinaires denses qu'elles permettent de former (Mangenot, 1974). Ces nombreuses racines influencent les conditions physiques et chimiques du sol environnant, par absorption de l'eau et des ions, drainage et rhizodéposition (sécrétion d'exsudats) (Gobat *et al.*, 2003). Il faut donc les considérer comme actrices actives dans le fonctionnement et la structuration des épisolums humifères.

6.5 Court terme

6.5.1 Matériel & Méthodes

Sur le terrain : échantillonnage et prise de données

Sur la base des premiers sondages, sept autres stations sont choisies dans le même transect, dont cinq sur zones remaniées (6, 14, 15, 18, 23) et deux sur zones non remaniées (12 et 21). De la terre fine est récoltée pour les analyses pédologiques. De plus, un cube de terre de 10 cm x 10 cm de surface x 15 cm de hauteur est extrait afin de mesurer les stocks de C_{org} . Notons que la terre fine n'est pas prélevée selon les horizons, mais sur la totalité des 15 cm de profondeur. En effet, l'approche agronomique est sollicitée, contrairement à l'approche pédologique classique, qui tend à souligner le fonctionnement des profils, donc à les analyser par horizons.

En laboratoire : recherche pédogénétique

Analyses pédologiques. Les analyses pédologiques suivantes sont effectuées sur la terre fine d'après les protocoles du laboratoire Sol & Végétation (LEVP, 2001) :

- Taux d'humidité
- Perte au feu
- pH H_2O & pH KCl
- Carbone organique d'après la méthode Anne
- Indice pyrophosphate
- Indice REG

- Granulométrie organo-minérale (Fractions : 0-5, 5-50, 50-200, 200-2000, >2000 μm)
- CHN sur la fraction <50 μm de la granulométrie
- "Rock-Eval pyrolysis"

Comme certains des échantillons sont très riches en matière organique, les protocoles pour les tourbes sont privilégiés. En ce qui concerne les deux dernières analyses, elles sont effectuées de manière classique dans le laboratoire de Géodynamique de la biosphère (LGB), à l'institut de géologie de l'Université de Neuchâtel. Enfin, la granulométrie est exécutée selon une adaptation du protocole habituel, faite par le laboratoire Sol & Végétation, pour les horizons organo-minéraux des sols classiques (LSV, 2007). Il est également nécessaire de calculer le taux d'humidité le même jour que cette manipulation, afin de corriger les poids et avoir un pourcentage exact de chaque fraction.

Stock de carbone. Les cubes de terre sont séchés à l'air puis tamisés à 2 mm, afin de déterminer la proportion de terre fine (<2 mm) et d'éléments grossiers, ou squelette (>2 mm). Le taux de C_{org} est dosé sur cette terre fine, ce qui permet d'en calculer les stocks selon la formule :

$$Stock(t/ha) = C * E * D$$

C : Pourcentage de C_{org} (g/100g)

E : Epaisseur de l'horizon (cm)

D : Masse volumique (g/cm^3)

Analyses statistiques. Les données de ce volet sont traitées avec le logiciel Matlab[©], à l'aide d'analyses multivariées et de tests statistiques. Les analyses en composantes principales (ACP) sont bien adaptées et permettent de voir les corrélations entre les sites.

6.5.2 Résultats

Analyses pédologiques

Les résultats des analyses pédologiques citées au paragraphe 6.5.1 sont présentés dans le tableau (TAB. 6.2)⁵. Dans un premier temps, les résultats sont brièvement détaillés dans le texte pour chacune des expériences. Puis ils sont mis en relation pour l'ensemble des sept profils choisis pour ce volet. Certains sont issus des mêmes stations décrites auparavant (chapitre 6.4.2) et d'autres de stations différentes.

⁵Pour le détail des résultats, se référer aux annexes C.19 à C.24.

TAB. 6.2 – Résultats des analyses pédologiques

Analyses	Echantillons							
	6	12	14	15	18	21	23	
Teneur en eau %	3.98	6.65	1.71	2.12	2.42	8.69	7.94	
Perte au Feu (% M.O.)	13.93	59.91	11.62	18.86	21.43	88.92	84.71	
Indice pyrophosphate	20.77	4.63	14.53	10.20	27.73	4.00	3.40	
Indice REG	0.52	19.57	1.19	2.97	1.02	18.61	26.67	
Carbone organique (%)	5.45	37.39	6.32	9.48	10.13	45.07	38.05	
C/N	14.65	26.33	24.06	22.24	20.91	25.42	21.26	
H/C	0.50	0.22	0.25	0.26	0.25	0.24	0.22	
Taux d'humification ($C_{org < 50 \mu m} / C_{org total}$)	0.78	0.70	0.70	0.68	0.57	0.81	0.91	
Stock de C_{org} (t/ha)	35.44	51.20	6.22	6.76	49.99	129.18	70.64	
pH H_2O	4.2	3.1	3.4	3.6	3.5	3.4	3.5	
pH KCl	3.5	2.4	2.7	2.9	2.6	2.8	2.7	
Granulométrie (%)	0-5 μm	7.9	1.4	6.7	4.7	4.4	1.0	0.2
	5-50 μm	48.9	7.8	53.3	43.4	41.1	6.2	0.7
	50-200 μm	32.3	17.0	22.7	21.6	26.3	18.4	8.4
	200-2000 μm	10.8	73.2	17.1	29.9	27.9	61.3	82.2
	>2000 μm	0.1	0.6	0.2	0.4	0.3	13.1	8.5
"Rock-Eval pyrolysis" (%)	F1	24.7	14.9	15.7	21.1	25.2	21.1	19.3
	F2	32.2	29.0	27.7	25.5	29.5	34.1	22.9
	F3	28.1	34.9	34.8	32.3	30.6	35.7	39.5
	F4	15.0	21.3	21.8	21.1	14.8	9.2	18.3

La teneur en eau des profils (annexe C.18) se situe entre 1.7 et 8.7%, mais il n'y pas de grandes différences au sein des échantillons. Le même phénomène s'observe avec les mesures de pH (annexe C.19). Le pH H_2O varie entre 3.1 et 4.2 et le pH KCl entre 2.4 et 3.5. Tout deux sont extrêmement acides, si ce n'est l'échantillon 6 qui se démarque par la valeur la moins basse (pH H_2O : 4.2 & pH KCl : 3.5).

Par contre la teneur en matière organique (annexe C.18), mesurée par la perte au feu (PAF), varie entre 12% et 89%, et rallie les horizons en deux grands groupes. L'analyse du C_{org} selon la méthode Anne (annexe C.20), qui varie entre 5% et 45% présente les mêmes tendances. Pourtant, le calcul des stocks de C_{org} (annexe C.21) distingue un troisième groupe intermédiaire. La valeur la plus basse est de 6.2 t/ha pour un maximum de 129.2 t/ha, avec un groupe présentant des valeurs entre 35 et 70 t/ha.

L'indice au pyrophosphate (annexe C.22) mesuré présente quelques variations. Il classe les profils en trois catégories : l'une entre les valeurs 3.4 et 4.6, l'autre entre 10 et 15 et un profil avec un maximum à 27.7. Un des échantillons (6) a une valeur intermédiaire et il est difficile de le rattacher à une de ces classes.

En revanche, les résultats des analyses granulométriques (annexe C.24) confirment la tendance générale de deux groupes. L'un avec une proportion majoritaire de la fraction 5-50 μm et l'autre de la fraction 200-2000 μm .

L'indice REG (annexe C.22) affirme à nouveau ces deux catégories. Il est calculé selon la formule :

$$\text{IndiceREG} = \frac{\text{Fraction} > 200\mu\text{m}}{\text{IndicePyrophosphate}}$$

La fraction $< 50 \mu\text{m}$ est analysée au CHN. De ces résultats, les rapports C/N massique, H/C atomique et le pourcentage d'humification (Andreux & Correa, 1981) sont calculés. Le premier donne des valeurs entre 20.9 et 26.4, sauf pour l'échantillon 6 qui se démarque avec un rapport inférieur de 14.7. Le second se situe entre 2.2 et 2.6, sauf pour le même échantillon 6 qui a un taux plus élevé, soit de 4.9.

Le taux d'humification varie du simple au double au sein des échantillons (entre 0.57 et 0.91).

$$\text{TauxHumification} = \frac{C_{org} < 50 \mu\text{m}}{C_{orgTotal}}$$

Après déconvolution des courbes obtenues avec l'analyse au "Rock-Eval pyrolysis" (annexe C.23), l'aire correspondant à chacune de ces courbes ainsi que les résidus sont mesurés. Le coefficient r^2 est calculé sur cette base. Dans le cas présent, l'analyse des courbes ne permet pas des valeurs très élevées pour celui-ci.

L'aire de la courbe F1 est maximale pour les échantillons 6 et 18, puis diminue dans les autres. Elle est minimale dans les profils 12 et 14.

L'aire de la courbe F2, diminue progressivement de l'échantillon 6 puis 12, 14, 15 et enfin 23. L'échantillon 21 a l'aire la plus élevée et pour le 18, elle se situe entre celle de l'échantillon 6 et celle de l'échantillon 12.

Les aires des courbes F3 des échantillons 12, 14 et 21 sont similaires (entre 34.8% et 35.7%). L'échantillon 6 présente l'aire minimale et l'échantillon 23 l'aire maximale.

Enfin, les proportions calculées sous la courbe F4 sont maximales pour le 14, minimales pour le 21 et deux groupes intermédiaires apparaissent (6, 18 et 12, 15, 23).

Analyses statistiques

Les résultats des analyses statistiques sont discutés dans la section suivante.

6.5.3 Discussion

Recherche d'un critère d'évolution rapide

Les analyses en composantes principales (FIG. 6.5), dont les deux premiers axes principaux portent 88.83% de la variance, vérifient les deux groupes d'échantillons distingués avec les résultats des analyses pédologiques. Le premier (12, 21, 23) est d'une manière générale caractérisé par sa richesse en matière organique, C_{org} , et fibres (à droite de la figure 6.4).

Le second groupe (6, 14, 15, 18) est corrélé au matériel minéral (à gauche de la même figure). En effet, les fractions minérales de la granulométrie ($G1 = 0-5 \mu\text{m}$ et $G2 = 5-50 \mu\text{m}$) ainsi que l'indice pyrophosphate s'opposent au groupe précédent ($\%C_{org}$, $\%M.O.$, $G3 = >2000 \mu\text{m}$, stock de C_{org} , indice REG et C/N). Le pH est corrélé au rapport H/C et est indépendant des autres analyses.

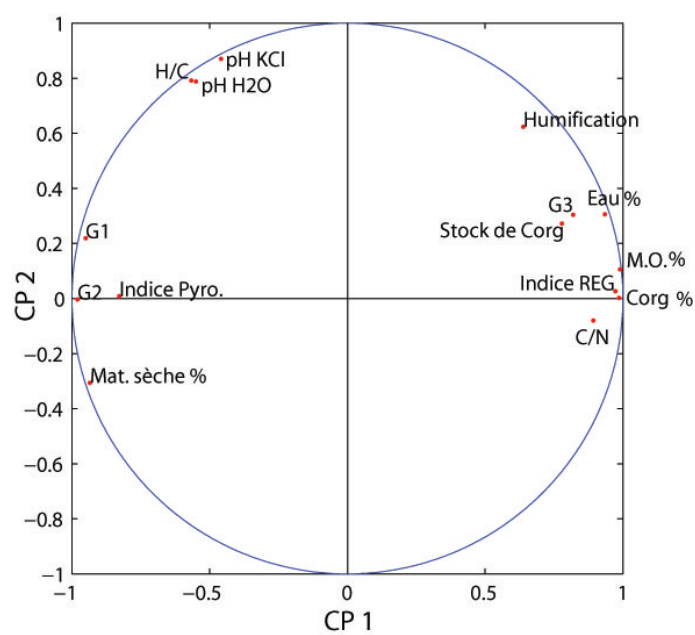


FIG. 6.4 – Cercle des corrélations

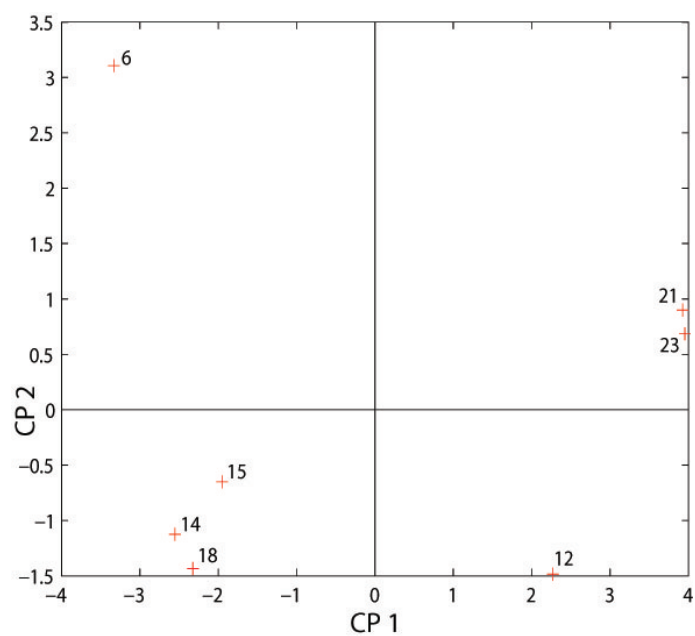


FIG. 6.5 – Analyse en composante principale

Cependant, ces deux groupes d'échantillons sont eux-mêmes divisés et globalement 4 catégories ressortent (FIG. 6.5).

Le premier est l'échantillon 6, isolé et opposé à un autre échantillon isolé, le 12, qui correspond au deuxième groupe. Ces échantillons se distinguent essentiellement par leur forme d'humification. Le 6 est humifié, bien que différemment des 21 et 23, alors que le 12 ne l'est pas. Le rapport H/C est en effet le plus bas de tous les échantillons pour le 6, donc le plus pauvre en composés aromatiques. Pour le 12, ce *ratio* est le plus élevé donc le plus pauvre en composés aliphatiques, dont les acide fulviques. Cet échantillon contient donc beaucoup d'humine héritée à base de lignine. Les valeurs des pH suivent les mêmes tendances. Elles sont maximales pour l'échantillon 6 et minimales pour l'échantillon 12.

Le troisième groupe comprend les échantillons 14, 15 et 18. Ils sont corrélés aux fractions minérales de la granulométrie et sont pour leur part mal humifiés contrairement au quatrième groupe. Ce dernier est formé de deux échantillons, 21 et 23, qui présentent une extrême similarité. En effet, le grand pourcentage de variance expliquée par les axes permet de dire qu'ils ont la même identité et la même dynamique. Pourtant, ces deux formes d'humus n'ont pas le même nom. La n°23 ressemble à la n°14 au point de vue morphologique mais non fonctionnel comme c'est le cas ici.

En ce qui concerne la recherche d'un critère d'évolution, elle ne peut pas aboutir grâce à ces seuls résultats. Les deux échantillons des sites non remaniés (12 et 21) présentent en effet des propriétés et des valeurs proches. Cependant, étant donné que les échantillons 21 et 23 montrent une forte similitude alors que l'un est intact et l'autre pas, les effets du remaniement ne sont pas visibles.

Il est intéressant de noter que l'indice REG des deux sites remaniés et supérieur à 10, ce qui les définit comme milieux intacts. D'après Gobat (1990), un milieu naturel déboisé et raclé devrait présenter un indice d'environ 2, avec un potentiel de régénération élevé. Dans le cas présent, il est beaucoup plus haut (18.6 et 19.6). Cependant, il s'agit d'une comparaison applicable pour les tourbes.

Les mesures quantitatives des analyses pédologiques fournissent des informations sur la qualité de la matière organique. Fierz & Guenat (1995) démontrent par des études sur les sols alluviaux, que ces renseignements peuvent être utilisés comme indicateurs des processus pédogénétiques.

En effet, le degré d'évolution de la matière organique suit l'augmentation

de la teneur en C_{org} , elle-même influencée par la qualité de la litière. C'est d'ailleurs la mesure des stocks de C_{org} qui représente au mieux cette évolution en se multipliant par un facteur 20 du stade pionnier (échantillon 14) au stade climacique (échantillon 21). Il faut toutefois modérer les résultats de cette mesure dans le cas présent. En effet, les valeurs des stocks de C_{org} sont évaluées en t/ha pour permettre des relations aux écosystèmes, mais sur le transect choisi les sites sont distants de quelques mètres seulement.

Les sols remaniés sont les plus riches en C_{org} de tous les échantillons. D'après les informations obtenues auprès des forestiers, le raclage s'est fait sur une dizaine de centimètres, ce qui laisse supposer que les horizons holorganiques occupaient ces 10 cm et que l'horizon organo-minéral n'a pas été touché.

De plus, les valeurs d'azote dans les sols sont d'autres indicateurs de l'évolution de la matière organique. Le rapport C/N de la fraction granulométrique $<50 \mu\text{m}$ représente la matière humifiée et donne une idée de l'activité biologique. Dans les sites remaniés, il traduit des litières à faible pouvoir de dégradation, résistantes aux organismes et aux attaques biochimiques, ce qui confirme l'hypothèse d'épais horizons holorganiques.

Les complexes organo-humiques jouent un rôle considérable dans l'édification des structures et l'orientation de la pédogenèse. Ils sont conditionnés par le type d'humus, la composition du matériel minéral et le pédoclimat (Duchaufour, 1995). La fraction 0-5 μm de la granulométrie reflète la proportion de micro-agrégats organo-minéraux. Elle est minoritaire dans les sites remaniés et le site 23. Cela signifie que ces sites sont riches en composés solubles à petites molécules qui favorisent le lessivage et la chéluviation, alors que les autres sites contiennent plus de composés insolubles à grosses molécules qui jouent le rôle de ciment et favorisent la formation des complexes argilo-humiques.

Les analyses "Rock-Eval pyrolysis" montrent que les échantillons 6 et 18 sont les plus riches en bio-macromolécules labiles, ou matériel végétal frais (courbe F1). Cette proportion diminue dans les autres échantillons, ce qui reflète que dans ces derniers, la minéralisation et la dégradation enzymatique sont particulièrement actives.

Les bio-macromolécules stables comme les biopolymères résistants (lignine et cellulose) sont représentés par la courbe F2. C'est l'échantillon 21, riche en humine héritée, qui en contient le plus, alors qu'en théorie cette proportion diminue dans les couches humiques, qui s'étendent sur 5 cm dans ce profil. Il est également intéressant de noter que l'échantillon 6, riche en

humine de polycondensation active, en contient une forte proportion, probablement liée à la litière riche en graminées qui se développent sur ce profil. Une diminution progressive apparaît ensuite dans le reste des échantillons, mise à part le 18. Le *ratio* F1/F2 indique cependant que tous les profils sont issus de sols forestiers (Sebag *et al.*, 2006), ce qui n'est pas le cas d'après les observations de terrain.

La courbe F3 représente les géo-macromolécules immatures, donc les substances humiques *sensus lato*. Les aires calculées sous ces courbes indiquent que les échantillons 12, 14, 21 et 23 en sont riches.

Enfin, la courbe F4 donne une indication sur la proportion de géo-macromolécules matures, donc de la fraction organique réfractaire.

Cependant, il faut noter que ces résultats sont obtenus sur l'ensemble des microcouches de chaque profil et non par horizon. Une correspondance parfaite ne peut donc pas être faite.

6.6 Conclusion & Perspectives

Dans un cadre de découverte et de description, la typologie est établie, mais la recherche pédogénétique n'aboutit pas à la détermination d'un critère d'évolution. Cependant, l'ensemble de ce travail permet une ouverture sur bien d'autres connaissances.

De par sa situation à l'interface entre la biologie et le minéral, l'étude morphologique et fonctionnelle des formes d'humus ne peut pas être considérée sans la faune du sol. Les effets qu'elle induit sur la structure et le fonctionnement des épisolums humifères sont primordiaux. Le cadre de ce travail n'intègre pas cet élément et il serait fort intéressant, voire élémentaire, de faire des études plus poussées à ce sujet, sans oublier les microorganismes. Par exemple, Duchaufour & Pochon (1955), démontrent que le rapport entre les bactéries et les champignons permet une étude des groupements microbiens responsables des différentes réactions des cycles de l'azote (N) et du carbone (C).

D'autre part, une grande diversité des formes d'humus se retrouve dans des conditions générales homologues (climat, altitude). Parfois, à deux synusies similaires correspondent deux formes d'humus distinctes, et *vice versa*. Cela se manifeste également pour les sols, où à distance réduite (de l'ordre du mètre) des sols différents peuvent se développer.

La recherche pédogénétique fournit une faible quantité d'information, contrairement à ce que les objectifs prévoient. Des analyses plus poussées, comme par exemple sur la maturation de la matière organique, compléteraient bien ce volet. Cela pourrait aussi fournir des pistes pour les forestiers qui recherchent à promouvoir la repousse des épicéas dans cette forêt.

Revenons encore une fois sur l'importance des bryophytes. Dans le cadre du transect choisi elles sont bien présentes et comme déjà énoncé, forment parfois la seule végétation en place. Il faut donc les considérer comme actrices actives dans le fonctionnement et la structuration des épisolums humifères. La classification de Green *et al.* (1993) tient compte de l'importance dans la structuration des épisolums humifères des bryophytes vivantes enracinées dans la litière. Il propose de les définir par un horizon "s". Une correspondance de ce type d'horizon dans les autres nomenclatures est selon moi essentielle. Une démarche dans ce sens a d'ores et déjà été faite lors d'un congrès (Eurosoil) en 2004. Jabiol *et al.* (2004) propose de reconnaître les horizons de mousses vivante et de les rattacher à un horizon "M".

Les épisolums humifères tiennent donc un rôle important dans les écosystèmes forestiers. Ils sont le site de nombreux phénomènes : activité biologique, interaction entre organismes, habitats de ceux-ci, support physique, carrefour énergétique, humification, minéralisation, turnover de la matière organique.

Ils intègrent deux échelles temporelles, l'une en surface, miroir des décennies récentes, et l'autre plus en profondeur, mémoire des siècles antérieurs. Les cycles biogéochimiques ne peuvent pas compter sans eux.

Chapitre 7

Discussion commune

Dynamiques de mise en place du paysage

La mise en place du paysage actuel commence pendant la glaciation du Würm. D'après Aubert (1965), une calotte de glace se forme à l'intérieur de la chaîne jurassienne. Elle a son foyer dans la vallée de Joux et rencontre le glacier du Rhône au pied du Jura. Au nord-est de la chaîne, vers la zone qui nous intéresse, il n'est fait état que de glaciers locaux minces. Si notre lieu d'étude a été recouvert par l'un d'eux, il n'y a actuellement aucune trace de moraines ou autres éléments du système glaciaire. De plus, il est certain que les glaciers alpins ne sont pas montés aussi haut pendant le Würm. Haefeli (1966) décrit des moraines alpines würmiennes aux alentours d'Orvin et le plus élevé des blocs erratiques se trouve à 1290 m d'altitude près de la métairie Jobert¹.

En revanche, la dynamique périglaciaire a marqué le paysage. Pendant une telle période de rhexistase, l'érosion est intense. La roche peut être mise à nu et subir la cryoclastie, qui la fait littéralement éclater. La Dalle nacrée est influencée par ce phénomène ainsi que par l'altération. Des silex se retrouvent en surface et sont eux-mêmes repris par la gélifraction. C'est pourquoi ils ont des arrêtes vives.

Puis, les glaciers se retirent peu à peu, abandonnant devant eux des plaines poussiéreuses. Le vent en emporte une partie et redépose des particules, principalement des limons, sur les endroits dénudés. Environ 40 cm de loess sont déposés sur le Jura (Pochon, 1973, 1978), provenant des moraines rhodaniennes et sariniennes du plateau suisse. Ces particules sont ensuite redistribuées et déposées en fonction de la pente et de la végétation. Dans les versants, elles sont rapidement ruisselées et leur trace n'est plus visible aujourd'hui. En revanche, dans les cuvettes ou sur les endroits plats, d'im-

¹Carte nationale swisstopo 1 : 25'000, n°1125.

portantes épaisseurs de loess peuvent être piégées. Le climat se réchauffe à la fin du Pléistocène. Les périodes du Bölling et de l'Alleröd (environ -15'000 à -13'000 ans) sont favorables à une phase de biostasie. La végétation regagne du terrain et s'installe également en altitude, permettant ainsi une pédogenèse. Le terrain se stabilise, les phénomènes d'altération sont intenses. Les premiers sols se développent, sous forme de RENDOSOLS ou de RENDISOLS. Puis d'autres d'autres sols évoluent, selon le matériau parental : des CALCOSOLS ou des CALCISOLS sur calcaire et des BRUNISOLS dans les loess.

Des épisodes plus froids sont relatés, dont le dernier et le plus important est le Dryas récent (environ -13'000 à -11'400 ans). Une végétation de toundra et de bouleaux s'installe en Suisse (Legros, 2007). Les sommets sont en partie dénudés et une nouvelle phase de rhexistasie provoque de l'érosion à certains endroits. Sur notre zone d'étude, une poche de silex affleurante, probablement proche de la frontière entre les communes de Cortébert et Courtelary, est éclatée sous l'action du gel et migre par un mouvement de scree slope jusqu'à sa position actuelle. Une partie des sols existants et des loess sont repris et redistribués. Certains sont emportés jusque dans la mer du Nord par le bassin versant de l'Aar, alors que d'autres se redéposent un peu plus tôt, modelant ainsi un nouveau paysage.

Vers - 10'000 ans commence l'Holocène et un climat plus doux s'établit. Pendant cette nouvelle phase de biostasie, la végétation revendique ses droits jusqu'aux sommets du Jura et la pédogenèse reprend. Les substrats sont multiples, allant de la roche calcaire affleurante à l'accumulation de particules fines sur plus de 75 cm, en passant par des blocs colluvionnés ou des clastites de silex amoncelées sur plus d'un demi-mètre. La roche est altérée et libère des éléments. Les sols se structurent et parfois le fer est chélaté et migre. La végétation évolue vers le climax, à savoir, pour cet étage, la Hêtraie à érable. A certains endroits où les conditions édaphiques ou géologiques sont particulières, des climax stationnels se précisent. C'est le cas notamment pour la forêt de conifères et myrtilles sur les silex ou pour les différentes prairies humides sur les sols hydromorphes de bas de pente.

Des organismes s'installent alors dans ces nouvelles conditions et apportent, transforment, fabriquent de la matière organique. En parallèle à la pédogenèse, les formes d'humus se mettent en place. La végétation apporte du matériel frais qui s'accumule, s'humifie et se minéralise sous les effets de cette nouvelle vie. Ces formes d'humus reflètent aujourd'hui deux échelles temporelles, l'une récente en surface et, plus en profondeur, celle des siècles derniers.

En effet, l'arrivée de l'homme qui exploite les forêts, fabrique du charbon et déboise les crêtes est clairement visible à l'échelle de l'épisolum humifère. Qu'il s'agisse de changements récents (de l'ordre d'une dizaine d'années)

comme c'est le cas ici ou de changements plus vieux comme dans l'histoire de la mise en pâtures des forêts (Havlicek, 1999), les traces s'y retrouvent.

L'homme colonise ces lieux, puis choisit les endroits les plus propices, soit les plus productifs et accessibles, pour créer des pâturages. Ces terres sont gagnées principalement sur la Hêtraie. Les versants, marécages ou autres zones peu favorables sont laissés à eux-mêmes. On y retrouve aujourd'hui la végétation du climax stationnel, où du moins proche de ce qu'il est susceptible d'être comme tel. Mais, pas toutes les zones exploitées par l'homme ne cicatrisent de la même manière. En effet, les crêtes du Jura restent aujourd'hui pelées.

Influence des silex sur le paysage

Les trois échelles abordées confirment que le substrat siliceux, sur le mont central de la zone d'étude, a une influence sur le paysage et le fonctionnement du système en place.

Au premier abord, cette forêt au milieu des pâturages ne passe pas inaperçue. Sa composition floristique, regardée de plus près, est singulière et toujours inclassable. Elle est révélatrice de conditions très acides. Par terre, à la surface du sol, se trouvent des morceaux de silex aux arrêtes vives. Ces cailloux s'étendent sur toute la zone de la forêt, mais ce n'est qu'au milieu que leur épaisseur atteint 90 cm. Ils semblent issus d'une seule poche qui aurait éclaté et migré sous l'action du gel. Les formations superficielles sont donc liées au système périglaciaire et à l'action diffuse des eaux, qui peuvent colluvionner des cailloux individuellement. A l'échelle du sol, les silex prennent alors une place fondamentale là où leur épaisseur est maximale. De par leur arrangement spatial et la porosité qui en découle, leur altérabilité quasiment nulle et leurs propriétés chimiques, ils tiennent une place importante dans les processus pédogénétiques qui s'y déroulent. Ces derniers s'orientent vers une voie acide, renforcée par l'apport de litière de la végétation en place. L'eau s'infiltré particulièrement bien à travers les silex et la podzolisation est possible. Dans les épisolums humifères, l'action de la pédofaune est prépondérante, car c'est elle qui fait le lien entre l'organique et le minéral. Dans ce contexte à pH bas, le fonctionnement de l'humus se trouve alors diminué et de la matière organique s'accumule en surface.

La zone à silex

En interpolant les différents résultats, il est possible de faire une projection de la couche édaphique présente dans la forêt à silex (FIG. 7.1). A la fin du Würm, il faut imaginer la Dalle nacrée nue avec quelques silex en surface.

Les loess se déposent pendant le retrait des glaciers. Il peut y avoir un certain ruissellement de ces apports éoliens. Puis, une pédogenèse débute. Impossible de dire si elle est de type carbonaté mais les sols évoluent en direction du groupe des BRUNISOLS. La Dalle nacrée influence parfois la pédogenèse. En effet, "en fonction de l'épaisseur du loess, une autre évolution apparaît lorsque la végétation a accès au matériau calcaire sous-jacent" (Havlicek *et al.*, 1998). Dans la forêt, la présence de silex *in situ* isole en partie les sols des carbonates et la désaturation du complexe argilo-humique continue. Les silex sont alors mobilisés par un mouvement de scree-slope et forment une couche continue d'environ un demi-mètre. A cet endroit, la brunification s'arrête. Ailleurs, il est difficile de savoir si les processus pédologiques sont stoppés ou non. Cela étant, les sols formés auparavant continuent leur évolution vers les PODZOSOLS OCRIQUES en reprenant les différents horizons déjà formés et ce, sur l'ensemble de la zone à silex. Dans le sol 6², la pédogenèse recommence. Les différents morceaux calcaires présents avec les silex permettent dans un premier temps le développement de sols neutres en surface. Une fois tous les carbonates éliminés, la végétation change et devient acidophile. C'est alors qu'un nouveau cycle peut débiter : la podzolisation. En marge de la forêt, la Dalle nacrée, plus proche de la surface, empêche les BRUNISOLS de progresser vers les PODZOSOLS. Le sol 9³ en est un bon exemple.

D'une manière générale, les formes d'humus reflètent également une évolution. Dans le pâturage elles font partie du groupe des mulls (oligomulls) et se développent sur des ORGANOSOLS CALCAIRES et des CALCOSOLS. Puis dans la zone de transition avec la forêt, les horizons holorganiques sont de plus en plus épais, formant alors des dysmulls sur des BRUNISOLS OLIGOSATURÉS. Enfin, au coeur de cette forêt, là où les PODZOSOLS OCRIQUES se forment, l'épaisse couche de silex influence les formes d'humus vers des moders. A certains endroits, là où l'accumulation des débris est favorisée et où l'action de la faune ralentie, la formation de mor est possible.

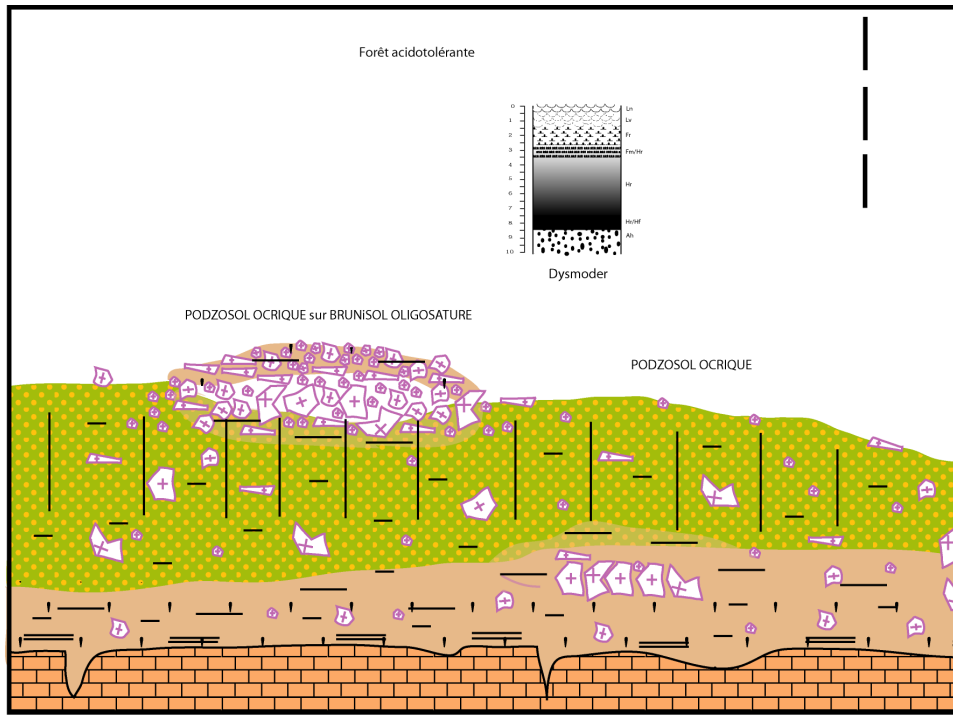
La généralisation énoncée ci-dessus présente cependant des exceptions. Elles sont liées à l'exploitation anthropique qui a dénudé le sol et mis les silex à nu sur des zones précises. Nous nous sommes demandés si la situation imposée par ces remaniements peut être rattachée à l'époque suivant les mouvements de scree-slope des silex. Cependant, la matière organique infiltré en profondeur dans le squelette des solums n'est pas supprimée... Un retour dans le passé n'est alors pas justifié.

La végétation a également évolué conjointement à ces phases historiques.

²PODZOSOL OCRIQUE sur BRUNISOL OLIGOSATURÉ. Pour les détails concernant ce sol, se référer à l'annexe B.6.

³BRUNISOL OLIGOSATURÉ. Pour les détails concernant ce sol, se référer à l'annexe B.9.

Les espèces calcicoles ont peu à peu laissé leur place aux espèces acidophiles, qui ont finalement pris le dessus. En effet, les plantes s'enracinent à des profondeurs différentes. La stratification verticale est en général un bon reflet de celle de l'enracinement. C'est pourquoi, lorsque des cailloux carbonatés sont présents à proximité de la surface du sol, toutes les espèces peuvent profiter des ions libérés par ceux-ci. Au fur et à mesure que le front des carbonates descend, les cations basiques ne sont plus accessibles pour les espèces herbacées, mais toujours pour les arbres. Une fois tous les calcaires dissous, les processus de podzolisation se mettent en place et acidifient les sols. Les espèces acidophiles envahissent alors la forêt et lui donnent son caractère unique qu'elle a encore aujourd'hui.

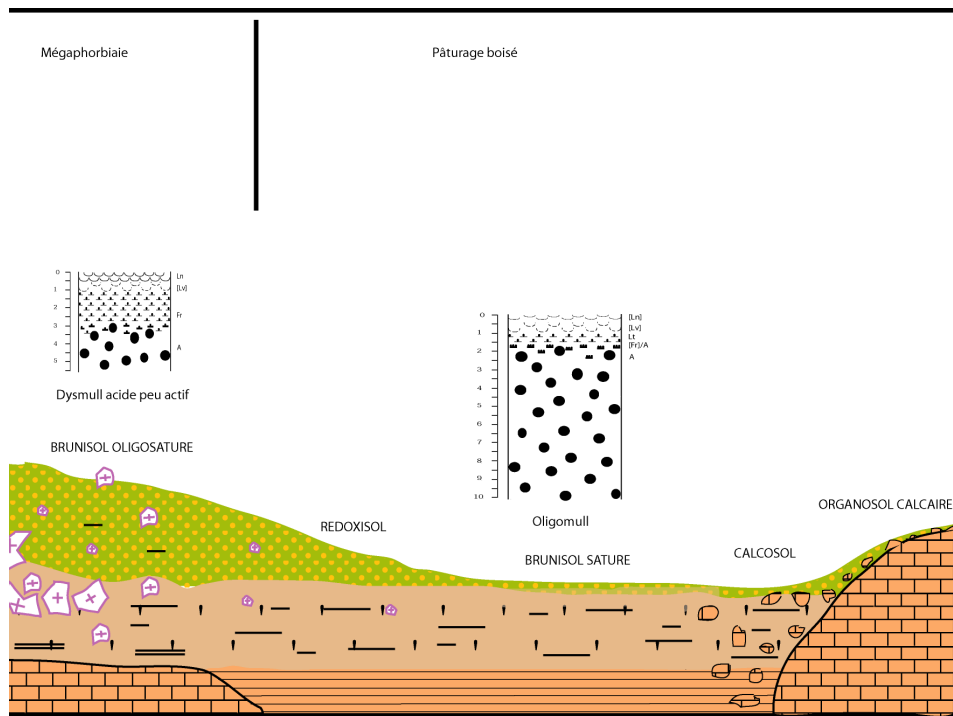


Légende

Formations superficielles et roches	
Roche calcaire dure	
Marnes	
Horizon d'altération	
Dépôts de loess (sub-en place)	

Pédologie et processus	
Silex	
Argiles	
Argiles carbonatés	
Limons	
Migration du fer	

FIG. 7.1 – Schématisation de la zone à silex en coupe selon un axe allant de la forêt sur silex aux pâturages boisés.



Formes d'humus	
Horizon OLn	
Horizon OLv	
Horizon OFr	
Horizon OFm	

Horizon OHr	
Horizon OHf	
Horizon A biomacrostructuré	
Horizon A de juxtaposition	

Chapitre 8

Conclusion générale

Utilité de l'étude

Comme "recherche fondamentale", ce travail ne répond à aucune attente. Cependant, de nombreuses personnes rencontrées pendant cette année ont semblé intéressées à nous lire, à notre grande satisfaction. En effet, cette zone bien spéciale est connue depuis longtemps par les propriétaires de ces terrains, les forestiers, les phytosociologues ou encore les géologues curieux. Cependant, personne jusqu'à ce jour n'a tenté d'y apporter une explication. De plus, ce lieu appartenant au Parc régional Chasseral, nos données seront peut-être utiles à son futur plan de gestion.

Perspectives

Comme déjà énoncé dans les chapitres précédents, le travail fourni n'est pas suffisant à une compréhension détaillée de la zone. De futures études sont nécessaires à chaque niveau.

Du point de vue de la géologie, il pourrait être intéressant de mieux caractériser les silex de la zone. Leur composition précise, les conditions nécessaires pour qu'ils s'altèrent et ce qu'ils relâchent dans ce cas, leur formation au sein de la Dalle nacrée et la forme des inclusions dans la roche sont autant de précisions qui pourraient être apportées. La répartition actuelle des silex comprend encore beaucoup d'inconnues, comme la profondeur du dépôt sur toute la zone, la granulométrie des cailloux et des pierres, l'étude des arrêtes et de l'altération des faces. Egalement dans le domaine des formations superficielles, une étude plus complète sur les loess apparaît indispensable, comme déjà discuté au chapitre 4.

Les zones humides brièvement étudiées au chapitre 4.6.5 pourraient également faire l'objet de plus amples recherches. En effet, les quelques sondages et relevés effectués ne permettent pas d'expliquer la répartition des différentes

prairies humides. Une étude sur les sols et le régime hydrique du versant pourrait peut-être permettre de trouver les facteurs déterminants pour la distribution particulière des zones de végétation. D'autre part, une recherche sur la phytosociologie et la physiologie des plantes présentes pourrait apporter un point de vue intéressant.

Finalement, à l'échelle de l'humus, la microfaune et la microflore bactérienne jouent un rôle fondamental et n'ont pas du tout été abordées dans ce travail.

Nécessité de l'interdisciplinarité

L'ensemble du travail présenté aboutit à une compréhension globale dans l'espace et dans le temps. Trois recherches précises dans différents domaines permettent de tirer des relations entre eux, de confronter des idées, de réfléchir en ouvrant les yeux sur d'autres aspects.

Les systèmes naturels sont complexes et c'est pourquoi une approche multidisciplinaire doit être utilisée. Une telle vision est plutôt novatrice dans le monde de la recherche. En effet, les études qui mettent en parallèle divers domaines existent mais sont peu nombreuses (Bullinger-Weber, 2007; Havlicek, 1999). De plus, il s'agit souvent de relations recherchées d'après les résultats obtenus, plutôt qu'une approche globale dès l'établissement des objectifs. L'exemple le plus classique est celui des zones alluviales. L'échelle temporelle est abordée mais l'échelle spatiale est mise en marge. De plus, il faut noter que l'approche en écologie du paysage est différente et n'est pas utilisée dans ce cadre.

La démarche faite ici s'inscrit dans une vision biogéoscientifique, où chaque système ne peut être compris indépendamment des autres.

Bibliographie et sources

Bibliographie

- ADATTE, T. 2000. Etude minéralogique des loess. *Pages 81–88 de : Dernier cycle glaciaire et occupations paléolithiques à Alle, Noir Bois*, vol. 10. Cahiers d'archéologie jurassienne.
- AFES. 1995. *Référentiel pédologique*. Paris : INRA.
- AFFOLTER, J. 2002. *Provenance des silex préhistoriques du Jura et des régions limitrophes*. Thèse de doctorat, Service et Musée cantonal d'archéologie, Neuchâtel (Archéologie neuchâteloise 28 ; 2 vol).
- ANDREUX, F., & CORREA, A. 1981. Caractères généraux de la matière organique de sols eutrophes et mésotrophes affectés ou non par des migrations particulières. *Coll. intern. CNRS*, **303**, 329–339.
- AUBERT, D. 1965. Calotte glaciaire et morphologie jurassiennes. *Eclo. Geol. Helv.*, **58**(1), 555–578.
- AUBERT, D. 1975. L'évolution du relief jurassien. *Eclo. Geol. Helv.*, **68**(1), 1–64.
- AUFRANC, J. 1985. *Titre inconnu*. Travail de diplôme, Université de Berne.
- BABEL, U. 1970. Gliederung und Beschreibung des Humusprofils in mitteleuropäischen Wäldern. *Geoderma*, **5**, 297–324.
- BAIZE, D., & JABIOL, B. 1995. *Guide pour la description des sols*. Coll. Techniques et Pratiques. INRA.
- BAL, L. 1970. Morphological investigation in two moder-humus profils and the role of the soil fauna in their genesis. *Geoderma*, **4**, 5–36.
- BARRATT, B.C. 1964. A classification of humus forms and micro-fabrics of temperate grasslands. *Jour. Soil Sci.*, **15**(2), 342–356.

- BARTOLI, F., JEANROY, E., & VEDY, J.C. 1979. Transfert et redistribution du silicium, de l'aluminium et du fer dans les podzols : rôle des composés organiques et des supports minéraux. *Coll. intern. CNRS*, **303**, 281–289.
- BARTOLOME, B. 1990. *Etude pédologique et phytosociologique de la tourbière des Saignolies (NE)*. Travail de diplôme, Institut de Botanique, Université de Neuchâtel.
- BENIAMINO, F., PONGE, J.F., & ARPIN, P. 1991. Soil acidification under the crown of oak trees. I. spatial distribution. *For. Eco. Man.*, **40**, 221–232.
- BERNIER, N. 1992. *Modification de la forme d'humus au cours du cycle sylvogénétique d'une pessière d'altitude*. Thèse de doctorat, Université de Paris XI-Orsay.
- BERNIER, N., & PONGE, J.F. 1993. Dynamique et stabilité des humus au cours du cycle sylvogénétique d'une pessière d'altitude. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie*, **316**, 647–651.
- BERNIER, N., & PONGE, J.F. 1994. Humus form dynamics during the sylvogenetic cycle in a mountain spruce forest. *Soil Biol. Biochem.*, **26**(2), 183–220.
- BLÖSCH, U., BADER, L., & BÜRGI, O. 1991. *Vegetationskartierung der Waldungen des Burgergemeinde Biel*. Tech. rept. Forstverwaltung, Burgergemeinde Biel.
- BORDAS. 1995. *Dictionnaire de la langue française*. Encyclopédies BORDAS.
- BOUCHÉ, M.B. 1974. Action de la faune sur les états de la matière organique dans les écosystèmes. *Pages 157–168 de : Biodégradation et humification*. Nancy : Kilbertus et al., Rapport du 1er colloque international.
- BOUDOT, J.P., & BRUCKERT, S. 1978. Complexes organo-métalliques et structures microagrégées des sols sur matériaux chloriteux du système schisto-grauwackeux vosgien. *Sci. Sol*, **1**, 31–40.
- BOUYER, Y., MISEREZ, J.J., & POCHON, M. 1978. *Inventaire géochimique et bilan du fer dans le sol et les eaux du karst jurassien : Etat, importance, déplacements*. Laboratoire de pédologie, vol. 1. EPFL.
- BRAUN-BLANQUET, J., & PAVILLARD, J. 1928. *Vocabulaire de sociologie végétale*. Troisième éd. Montpellier : Imprimerie Roumégous & Déhan.

- BRÊTHES, A., BRUN, J.J., JABIOL, B., PONGE, J.F., & TOUTAIN, F. 1995. Classification of forest humus forms. A french proposal. *Ann. Sci. For.*, **52**(6), 535–546.
- BRUCKERT, S., & GAIFFE, M. 1980. Analyse des facteurs de formation et de distribution des sols en pays calcaire glaciaire ou karstique. Plaine de Frasnè, Bonnevaux et Montagne du Laveron, Jura central. *Ann. Sci. Univ. Besançon, Biol. Vég. 4e s.*, **1**, 19–67.
- BULLINGER-WEBER, G. 2007. *Dynamique historique de la végétation et des sols alluviaux en relation avec les crues exceptionnelles*. Thèse de doctorat, Institut de Botanique. Université de Neuchâtel.
- BULLINGER-WEBER, G., LE BAYON, R.C., GUENAT, C., & GOBAT, J.M. 2007. Influence of some physicochemical and biological parameters on soil structure formation in alluvial soils. *Euro. Jour. Soil Bio.*, **43**(1), 57–70.
- BURGER, T., STOCKER, R., KAUFMANN, G., DANNER, E., & LÜSCHER, P. 1998. *Clé de détermination des stations forestières du Jura et du Jura bernois. Vol. 1 et vol. 2*. Soleure/Lenzburg, Birmensdorf : FNP Pédologie forestière.
- CATTIN, S. 1998. *Préparation des fameux verres de montre pour analyses RX*. Laboratoire des argiles, Institut de Géologie, Université de Neuchâtel.
- CHALUMEAU, L. 2003. *Protocole de laboratoire : Analyses granulométriques*. Institut de Géologie, Université de Neuchâtel.
- CHAUVAT, M., PONGE, J.F., & WOLTERS, V. 2007. Humus structure during a spruce forest rotation : quantitative changes and relationship to soil biota. *Euro. Jour. Soil Bio.*, **58**(3), 625–631.
- DELARZE, R., GONSETH, Y., & GALL, P. 1999. *Guide des milieux naturels de Suisse*. Delachaux & Niestlé.
- DUCHAUFOR, P. 1972. Evolution des sols conditionnée par le calcaire. *Coll. Etudes et Recherches, Université Nancy I*.
- DUCHAUFOR, P. 1983. *Pédologie : I. Pédogenèse et classification*. Paris : Masson.
- DUCHAUFOR, P. 1995. *Abrégés de pédologie. Sol, Végétation, Environnement*. Paris : Masson.

- DUCHAUFOR, P., & POCHON, J. 1955. Note sur la biologie des humus forestiers. *Ann. Inst. Pasteur*, **88**(2), 261–265.
- FIERZ, M., GOBAT J.M., & GUENAT, C. 1995. Quantification et caractérisation de la matière organique de sols alluviaux au cours de l'évolution de la végétation. *Ann. Sci. For.*, **52**(6), 547–559.
- FOLK, R.L., & WARD, C.W. 1957. Brazos River bar : a study in the significance of grain size parameters. *Jour. Sedim. Petro.*, **27**(1), 3–26.
- GAIFFE, M. 1987. Processus pédogénétiques dans le karst jurassien, analyse de la complexation organo-minérale en ambiance calcique. *Ann. Sci. Uni. Franche-Comté*.
- GALLANDAT, J.D., & GILLET, F. 1999. Le pâturage boisé jurassien. *Bull. Soc. Neuch. Sci. Nnat.*, **122**, 5–25.
- GALLANDAT, J.D., GOBAT, J.M., & CLAVIEN, Y. 2006. *Végétation de la Suisse, guide syntaxonomique*. Laboratoire Sol & Végétation, Institut de Botanique, Université de Neuchâtel.
- GILLET, F. 2006. *Méthodes d'étude de la végétation*. Institut de Botanique, Université de Neuchâtel.
- GOBAT, J.-M. 1984. *Ecologie des contacts entre tourbières acides et marais alcalins dans le Haut-Jura suisse*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Université de Neuchâtel.
- GOBAT, J.M. 1990. Quelques relations entre la végétation et la qualité physico-chimique des tourbes dans le Jura. *Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat.*, **113**, 207–214.
- GOBAT, J.M. 2006. *Protocole de description des sols*. Travaux pratiques, Master de Biogéosciences, Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel.
- GOBAT, J.M., & HAVLICEK, E. 1996. *Clé de sol. Principaux sols de Suisse*. Cours de pédologie biologique, Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel.
- GOBAT, J.M., ARAGNO, M., & MATTHEY, W. 2003. *Le sol vivant. Bases de pédologie, biologie des sols*. Deuxième éd. Collection gérer l'environnement n°14. Lausanne : PPUR.

- GREEN, R.N., TROWBRIDGE, R.L., & KLINKA, K. 1993. Towards a taxonomic classification of humus forms. *For. Sci. Monogr.*, **29**, 1–48.
- GUÉLAT, M. 1992. Géologie du Parc jurassien de la Combe-Grède. *In : Coup d'oeil sur la Combe-Grède et Chasseral*. Editions du Parc jurassien de la Combe-Grède / Chasseral.
- HAEFELI, C. 1966. Jura/Kreide-Grenzsichten im Bielerseegebiet. *Eclogae Geol. Helv.*, **59**.
- HANDLEY, W.R.C. 1954. Mull and mor formation in relation to forest soils. *For. Comm. Bul.*, **23**, 1–29.
- HAVLICEK, E. 1999. *Les sols des pâturages boisés du Jura suisse*. Thèse de doctorat, Institut de Botanique. Université de Neuchâtel.
- HAVLICEK, E., & GOBAT, J.M. 1996. Les apports éoliens dans les sols du Jura. Etat des connaissances et nouvelles données en pâturages boisés. *Etude et Gestion des Sols*, **3**(3), 167–178.
- HAVLICEK, E., & GOBAT, J.M. 1998. Les formes d'humus, révélatrices du fonctionnement de l'écosystème : un exemple des pâturages boisés du Jura suisse. *Ecologie*, **29**(1-2), 363–367.
- HAVLICEK, E., GOBAT, J.M., & GILLET, F. 1998. Réflexions sur les relations sol - végétation : trois exemples du Jura sur matériel allochtone. *Ecologie*, **29**(4), 535–546.
- HESELMANN, H. 1926. Studier över barrskogens humustäcke. *Meddelanden från Statens Skogsforskningsanstalt*, **22**, 169–552.
- JABIOL, B., BRÊTHES, A., PONGE, J.F., TOUTAIN, F., & BRUN, J.J. *L'humus sous toutes ses formes*. Nancy : ENGREF.
- JABIOL, B., ZANELLA, A., ENGLISCH, M., HAGER, H., KATZENSTEINER, K., & WAAL, R.W. 2004. Towards an european classification of terrestrial humus forms. *Eurosoil*, 1–10.
- JOLY, F. 1997. *Glossaire de géomorphologie*. Paris : Masson & Armand Colin.
- KASTHOFER, K. 1836. *Bericht über die Waldungen der Stadt Biel*.
- KUBIENA, W. 1943. L'investigation microscopique de l'humus. *Zeitschrift für Weltforstwirtschaft*, **10**, 387–410.

- KÜHNI, A. *Strukturgeologische Untersuchung in des Chasseral-Kette südlich von Corgémont/Sonceboz*. Travail de diplôme, Geologisches Institut, Universität Bern.
- LEGROS, J.P. 2007. *Les grands sols du monde*. PPUR.
- LEVP. 2001. *Manuel des méthodes d'analyses*. Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel.
- LOZET, J., & MATHIEU, C. 2002. *Dictionnaire des sciences du sol*. Deuxième éd. Paris : Lavoisier.
- LSV. 2006a. *Etude des formes d'humus : Description macromorphologique sur le terrain*. Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel.
- LSV. 2006b. *Etude des formes d'humus : Méthode Ponge, collecte des échantillons, observation et comptage des éléments figurés*. Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel.
- LSV. 2007. *Fractionnement physique de la matière organique : cas des horizons organo-minéraux des sols classiques*. Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel.
- MANGENOT, F. 1974. Propos liminaires sur l'humification. *Pages 1-14 de : Biodégradation et humification*. Nancy : Kilbertus et al., Rapport du 1er colloque international.
- MCKEAGUE, J.A. Dithionite- and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. Jour. Soil Sci.*, **46**, 499-505.
- MICHALET, R. 1982. *Influence du climat général sur l'évolution des sols à l'étage subalpin dans le Jura*. Thèse de doctorat, Biologie et Physiologie végétale, Université de Nancy I.
- MULLER, P.E. 1889. Recherches sur les formes naturelles de l'humus et leur influence sur le sol et la végétation. *Ann. Sci. Agr.*, 85-423.
- PEDRO, G. 1972. Les sols développées sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe. *Sci. Sol*, **1**, 5-18.
- PETTIJOHN, F.J., POTTER, P.E., & SIEVER, R. 1973. *Sand and sandstone*. Springer.
- POCHON, M. 1973. Apport allochtone dans les sols jurassiens (Jura vaudois et Jura neuchâtelois). *Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat.*, **96**, 135-147.

- POCHON, M. 1978. Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. *Mém. Soc. Helv. Sci. Nat.*, **90**, 1–190.
- PONGE, J.F. 1984. Etude écologique d'un humus forestier par l'observation d'un petit volume, premiers résultats. I. La couche L1 d'un moder sous pin sylvestre. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **21**(2), 161–187.
- PONGE, J.F. 1991. Succession of fungi and fauna during decomposition of needles in a small area of scots pine litter. *Plant and Soil*, **138**, 99–113.
- PONGE, J.F., & BRUN, J.J. *L'humus et la dynamique des forêts ligneuses*. Tech. rept. Projet de recherche, Comité E.G.P.N.
- RICHARD, J.L. 1961. Les forêts acidophiles du Jura. *Mat. Levé Géobot. Suisse*, **38**, 1–164.
- RICHARD, J.L. 1990. *Le rameau de sapin*, **4**, 29–30.
- RIGHI, D. 1984. Les sols sableux podzolisés des landes de Gascogne (France) : répartition et caractères principaux. *Sci. Sol*, **4**, 253–264.
- ROMELL, L.G., & HEIBERG, S.O. 1931. Types of humus layer in the forests of northeastern United States. *Ecology*, **12**, 567–608.
- ROSSEL, V. 2004. *Typologie des formes d'humus sur pergélisol au Creux-du-Van (NE, Suisse)*. Travail de diplôme, Laboratoire Sol et Végétation, Université de Neuchâtel.
- ROUILLER, J. 1981. *Analyses des sols. Techniques de laboratoire*.
- ROZÉ, F. 1989. Mise au point d'une méthode d'échantillonnage par points pour l'interprétation de lames minces : application à la comparaison de deux humus de landes après incendie. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **26**(2), 189–196.
- SAGOT, C., BRUN, J.J., GROSSI, J.L., CHAUCHAT, J.H., & BOUDIN, G. 1999. Earthworm distribution and humus forms in the development of a semi-natural alpine spruce forest. *Europ. Jour. Soil Bio.*, **35**(4), 163–169.
- SEBAG, D., DISNAR, J.R., GUILLET, B., DI GIOVANNI, C., VERRECCHIA, E., & DURAND, A. 2006. Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by "Rock-Eval pyrolysis" : bulk characterization and quantification of degradation. *Europ. Jour. Soil Sci.*, **57**, 344–355.

- SOUCHIER, B. 1984. Les podzols et la podzolisation en climats tempérés et montagnards.
- THIEBAUD, M. 1955. Sur la flore de la région biennoise et de la chaîne de Chasseral. *Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat.*, 105–130.
- TOUTAIN, F. 1974. *Etude écologique de l'humification dans les Hêtraies acidophiles*. Thèse de doctorat, Université Nancy I.
- TOUTAIN, F. 1981. Les humus forestiers : structures et modes de fonctionnement. *Biologie et Forêt*, **6**, 449–477.
- VADI, G. 1997. *Les dessous du Sphagno-Piceetum blechnetosum dans le Jura : caractérisation du paradoxe apparent de la podzolisation en domaine calcaire*. Travail de diplôme, Université de Neuchâtel.
- VERRECCHIA, E. 2006. *Cours de géodynamique de la biosphère*. Institut de Géologie, Université de Neuchâtel.
- WRB. 2006. *World reference base for soil resources*. Rapport FAO n°103.

Sources

- www1** Carte de la Suisse : www.map.search.ch
- www2** Ages des affleurements et fossiles du Jura :
<http://artic.ac-besancon.fr/svt/lithotheque/cartes/colonne/colonne.htm>
- www3** Météosuisse : www.meteosuisse.ch
- www4** Système d'information du territoire neuchâtelois : www.sitn.ch
- www5** Aide du logiciel XLSTAT : www.xlstat.com

Autres ouvrages consultés

- AESCHIMANN, D., & BURDET, H.M. 1994. *Flore de la suisse. Le nouveau Binz*. Neuchâtel, Suisse : Edition du Griffon.
- AMSTUTZ, R. 2005. *Les pelouses acidophiles de la combe anticlinale de Chasseral/Berne. Statut et déterminisme écologique dans une perspective de gestion durable*. Travail de diplôme, Laboratoire Sol & Végétation, Université de Neuchâtel.
- AUTEUR INCONNU. 1819. *Plan géométrique de la métairie appelée Pierrefeu*.
- AUTEUR INCONNU. 1954. Holz und Weide, Axt und Milchmelchter. *Schweizerische Milchzeitung, Schaffhausen*, 12 Novembre.
- AUTEUR INCONNU. 2006. Der Funke, der dem Stein entspringt. *Bieler Tagblatt*, 5 Juli.
- BOCQUIER, G. 1976. *La transformation des structures lors de l'altération et la pédogenèse - relations avec les transformations minéralogiques*. Conf. Univ. Neuchâtel.
- BORCARD, D., & BUTTLER, A. 1999. *Ecologie numérique*.
- BORCARD, D., & GILLET, F. 2007. *Multivariate analysis*.
- BOUDOT, J.P., & BRUCKERT, S. 1978. Complexes organo-métalliques et structures microagrégées des sols sur matériaux chloriteux du système schisto-grauwackeux vosgien. *Sci. Sol*, **1**, 31–40.
- BRESSON, L.M. 1974. *La rubéfaction récente des sols sous climat tempéré humide. Séquence évolutive sur fluvioglaciaire calcaire dans le Jura méridional (étude de microscopie intégrée)*. Thèse de doctorat, Université Paris VI.

- BROLL, G., BRAUCKMANN, H.J., OVERESCH, M., JUNGE, B., ERBER, C., MILBERT, G., BAIZE, D., & NACHTERGAELE, F. 2006. Topsoil characterization, recommendations for revision and expansion of the FAO-Draft (1998) with emphasis on humus forms and biological features. *Jour. Pl. Nutr. Soil Sci.*, **169**, 453–461.
- BRUCKERT, S. 1989. Lessivage vertical versus lessivage latéral : incompatibilité de ces deux grands phénomènes pédogénétiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **308**(2), 335–340.
- BRUCKERT, S., & GAIFFE, M. 1989. Processus de formation et de fonctionnement des sols en relation avec le réseau poral des roches. *Ann. Sci. Univ. Franche-Comté*, **4**(9), 37–48.
- BRUCKERT, S., BRETHERS, A., & SOUCHIER, B. 1975. Humification et distribution des complexes organo-métalliques des sols brunifiés et podzolisés. *Acad. Sci. Paris*.
- BRUCKERT, S., GAIFFE, M., DUQUET, B., TAVANT, Y., & TAVANT, H. 1986. Rôle du flux de calcium sur la stabilisation de la matière organique des sols. *Ann. Sci. Univ. Franche-Comté*.
- BRUCKERT, S., GAIFFE, M., GRATIER, M., & KISSLING, A. 1992. *L'effet de la roche sur les pédogenèses et le fonctionnement des sols du Jura*. SSP.
- CAMPY, M. 1982. *Le Quaternaire franc-comtois, essai chronologique et paléoclimatique*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- DUCHAUFOR, P. 1972. Evolution des sols tempérés sous la dépendance de l'eau (sols hydromorphes). *Coll. Etudes et Recherches, Université Nancy I*, 133–147.
- DUCHAUFOR, P. 1977. *Pédologie : I. Pédogenèse et classification*. Paris : Masson.
- DUCHAUFOR, P., & BARTOLI, C. 1966. Note sur l'évolution des sols calcimorphes de l'étage montagnard humide. *Sci. Sol*, **2**, 29–40.
- DUCHAUFOR, P., & SOUCHIER, B. 1978. Roles of iron and clay in genesis of acid soils under a humid, temperate climate. *Geoderma*, **20**, 15–26.
- FLAIG, W. 1970. Contribution à la connaissance de la constitution et de la synthèse des acides humiques. *Sci. Sol*, **2**, 39–72.

- GAIFFE, M., & BRUCKERT, S. Un problème lié au karst : la fuite des terres du Jura. *Ann. Sci. Uni. Franche-Comté*.
- GAIFFE, M., & BRUCKERT, S. 1985. Analyse des transports de matières et des processus pédogénétiques impliqués dans les chaînes de sols du karst jurassien. *Soils Geo. Cat. Suppl.*, **6**, 159–174.
- GAIFFE, M., & BRUCKERT, S. 1991. Déterminisme paléoécologique des écosystèmes actuels du Haut-Jura, en relation avec la fracturation des roches. *Ann. Sci. For.*, **48**, 575–591.
- GAIFFE, M., & KUEBLER, B. 1992. Relationships between mineral composition and relative ages of iron nodules in jurassian soil sequences. *Geoderma*, **52**, 343–350.
- GAIFFE, M., & SCHMITT, A. 1980. Sols et végétation à l'étage montagnard dans les forêts du Jura central (haute vallée du Doubs, de Mouthe à Pontarlier. *Sci. Sol*, **4**, 265–296.
- GAIFFE, M., DUQUET, B., TAVANT, H., TAVANT, Y., & BRUCKERT, S. 1984. Stabilité biologique et comportement physique d'un complexe argilo-humique placé dans différentes conditions de saturation en calcium ou en potassium. *Plant and Soil*, **77**, 271–284.
- GALLANDAT, J.D. 1982. *Prairies marécageuses du Haut-Jura*. Thèse de doctorat, Institut de Botanique. Université de Neuchâtel.
- GALVAN, P., PONGE, J.F., CHERSICH, S., & ZANELLA, A. in press. Humus components and soil biogenic structures in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. Jour.*
- GIRARD, M.C., WALTER, C., RÉMY, J.C., BERTHELIN, J., & MOREL, J.L. 2005. *Sols et environnement*. Paris : Dunod.
- GUILLET, B., ROUILLER, J., & SOUCHIER, B. 1976. Accumulations de fer (lépidocrocite) superposées à des encroûtements ferri-manganiques dans des sols hydromorphes vosgiens. *Bull. Soc. Géol. France*, **18**(1), 55–58.
- GUILLET, B., ROUILLER, J., & VEDY, J.C. 1979. Dispersion et migration de minéraux argileux dans les podzols. Contribution des composés organiques associés, leur rôle sur les formes et l'état de l'aluminium. *Coll. Intern. CNRS*, **303**, 49–56.

- GUILLET, B., VEDY, J.C., ROUILLER, J., & SOUCHIER, B. 1980. Migration de particules argileuses dans les milieux de géochimie organique très acide : exemple des podzols sur colluvium de grès vosgien. *Centre Pédo. Bio., Nancy*, 13–18.
- HANRION, M., TOUTAIN, F., BRUCKERT, S., & JACQUIN, F. 1975. Etude des composés organiques hydrosolubles présents dans un sol brun acide et dans un podzol sous hêtre. *Oeco. Planta.*, **10**(2), 169–185.
- HETIER, J.M., & FARDEAU, J.C. 1979. Diagnostic du fer mobile et assimilable des sols. *Coll. Intern. CNRS*, **303**, 421–428.
- IHAKA, R., & GENTLEMAN, R. 1996. R : a language for data analysis and graphics. *Jour. Computa. Graphic. Stat.*, **5**, 299–314.
- JOUAFFRE, D. 1989. *Pédogenèse et rubéfaction post-wurmiennes sur altérites crétacées en climat montagnard humide (Jura)*. Thèse de doctorat, Université de Fanche-Comte.
- KUBIENA, W. 1958. The classification of soils. *Jour. Soil Sci.*, **9**(1), 9–19.
- LAIGNEL, B., & MEYER, R. 2000. The flint dissolution of the clay-with-flints of the western Paris basin. *Bull. Soc. Géol. France*, **171**(5), 569–576.
- LEGENDRE, L., & LEGENDRE, P. 1998. *Numerical ecology*. Deuxième éd. Ecologie numérique, Masson. Paris : Elsevier Science B.V.
- PARADIS, E. 2002. *R pour débutants*. Institut des Sciences de l'Evolution, Université Montpellier II.
- PEDRO, G. 1976. *Systématique géochimique des processus pédologiques*. Conf. Univ. Neuchâtel.
- PONGE, J.F. 2003. Humus forms in terrestrial ecosystems : a framework to biodiversity. *Soil Bio. Biochem.*, **35**, 935–945.
- PONGE, J.F., ANDRÉ, J., BERNIER, N., & GALLET, C. 1994. La régénération naturelle : connaissances acutelles. Le cas de l'épicéa en forêt de Macot (Savoie). *Rev. For. Franc.*, **46**(1), 25–45.
- RAMANN, E. 1911. *Bodenkunde*. Troisième éd. Berlin : Julius Springer.
- RICHARD, J.L. L'épicéa à la limite inférieure de sa répartition naturelle dans le Jura suisse. *Jour. For. Suisse*, **3**, 153–164.

- RICHARD, J.L. 1957. Une carte de la végétation forestière naturelle dans le canton de Neuchâtel. *Jour. For. Suisse*, **7**, 147–152.
- RIGHI, D., & GUILLET, B. 1977. Datation par le carbone-14 naturel de la matière organique d'horizons spodiques de podzols des landes du Médoc (France). *IAEA-SM-211*, 187–192.
- ROUILLER, J., GUILLET, B., & BRUCKERT, S. 1980. Cations acides échangeables et acidités de surface. *Sci. Sol*, **2**, 161–175.
- ST-LAURENT, S., OUMET, R., TREMBLAY, S., & ARCHAMBAULT, L. 2000. Evolution des stocks de carbone organique dans le sol après coupe dans la sapinière à bouleau jaune de l'est du Québec. *Can. Jour. Soil Sci.*, **80**, 507–514.
- TOUTAIN, F., & VEDY, J.C. 1975. Influence de la végétation forestière sur l'humification et la pédogenèse en milieu acide et en climat tempéré. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **12**(1), 375–382.
- TOUTAIN, F., BRISON, M., BRUN, J.J., JANEL, P., & VILLEMIN, G. 1982. Transfert et diagenèse organique dans les sols. *Coll. intern. CNRS*, **303**, 95–101.
- ZANELLA, A. 2001. *Humus forestali*. Edizioni Centro di Ecologia Alpina.

Remerciements

Ce n'est pas parce que nous sommes trois que nous nous suffisons à nous-mêmes ! C'est grâce à de nombreuses personnes que nous écrivons aujourd'hui nos dernières lignes...

Nous tenons à remercier :

- les professeurs qui nous ont suivi et nous ont donné le goût du "biogéosciences" ; Jean-Michel Gobat & Eric Verrecchia
- les collaborateurs des deux laboratoires (LSV & LGB) dans lesquels nous avons travaillé, analysé, manipulé, cuit des pâtes. Un merci particulier à Claire Le Bayon, Géraldine Bullinger-Weber, Roxane Milleret, René Amstutz, Mathieu Goy, Lidia Mathys-Paganuzzi, Christophe Poupon, Yann Clavien, Thierry Adatte, Virgine Matera, Laurent Chalumeau et tous les autres...
- nos collègues d'étude pour nous avoir préparé les cafés et les apéros
- Fredi et Veronica de la Métairie du Milieu de Bienne pour nous avoir accueilli là-haut, fourni l'eau et les toilettes lors de la rude et fraîche saison de terrain (août à octobre 2006)
- le facteur de Bassecourt pour le ravitaillement
- Jean-François Ponge pour ses conseils et son aide notamment concernant les analyses statistiques
- Roger Langhor de l'Université de Gand en Belgique qui nous a lancé de nouvelles pistes de recherche
- le Professeur Pfeiffer, Jean-Claude Lavanchy et Sylvain Coudret de l'Institut de Géologie de l'Université de Lausanne, ainsi que Jean-David Teuscher de l'EPFL avec qui nous avons réalisé certaines expériences
- Peter Schneiter de la Bourgeoisie de Bienne pour nous avoir documenté et aidé à reconstruire l'histoire de la région
- le Parc régional Chasseral (très beau site... à voir absolument !)
- l'Office des forêts du canton de Bern à Tavannes et ses collaborateurs qui nous ont donné les autorisations nécessaires
- les communes de Courtelary et de Cortébert sur lesquelles notre terrain s'étend et qui nous ont autorisé à poser des pièges et casser quelques

racines

- un certain Jérémie pour son précieux soutien
- une certaine Nani pour sa patience
- nos parents qui se sont saignés pour payer nos études
- et tous ceux que nous avons involontairement oublié...